

# 博士論文

道路法面の3次元点群データに基づく  
変状抽出手法の確立と実用化に関する研究

A Study on the Establishment and Practical Application of  
a Deformation Extraction Method for Road Slopes Based on  
3D Point Cloud Data

令和7年9月

星野 裕二

岡山大学大学院  
環境生命科学研究所



## 要 旨

日本の高速道路網は、インフラの物質的な機能低下と建設・維持管理セクターの労働力不足という「二重の危機」に直面している。従来の近接目視点検は、交通規制による社会的損失や作業の危険性に加え、2012年の笹子トンネル事故が示すように、重大事故を防げない構造的限界を抱えている。本研究は、この課題を克服するため、MMS（モバイルマッピングシステム）で取得した3次元点群データにICPアルゴリズムを適用し、のり面の変状を安全かつ定量的に抽出する新手法の確立を目的とする。

まず、MMSの計測精度を走行速度（40–50km/h）、衛星配置等の条件下で多角的に検証し、実運用上、最大誤差30mm程度の高精度なデータ取得が可能であることを確認した。次に、模擬変状を設置した実在のり面での差分解析により、本手法が10mm規模のはらみ出しや20mmの亀裂を識別できることを実証した。さらに、点群のノイズを除去するフィルタリングが精度を大幅に向上させること、点群密度を元の4分の1に間引いても変状抽出が可能であることなど、手法の堅牢性も明らかにした。

本成果は、地図情報レベル500仕様の汎用MMSでも適用でき、広域のり面のスクリーニングや対策工前後の変化把握に有効である。危険な現場作業をオフィスでのデータ分析に転換し、データ駆動型の予防保全を可能にすることから、i-Constructionが掲げる3Dデータの利活用を実務レベルで実装するものである。将来的には、仮想空間モデルやAIによる自動変状分類との連携により、インテリジェント・メンテナンスの実現に貢献することが期待される。

## ABSTRACT

Japan's expressway network is facing a dual crisis: the material deterioration of its infrastructure and a critical labor shortage in the construction and maintenance sectors. Conventional close-range visual inspections have inherent structural limitations that fail to prevent major accidents, as tragically demonstrated by the 2012 Sasago Tunnel collapse, in addition to posing risks to worker safety and causing societal losses from traffic restrictions. To overcome these challenges, this research aims to establish a novel methodology that applies the Iterative Closest Point (ICP) algorithm to 3D point cloud data acquired by a Mobile Mapping System (MMS), enabling the safe and quantitative extraction of slope face deformations.

First, the measurement accuracy of the MMS was comprehensively validated under various operational conditions, including driving speeds (40–50 km/h) and satellite geometry, confirming that high-precision data acquisition with a maximum error of approximately 30mm is achievable in practice. Next, differential analysis on a real-world slope with simulated defects demonstrated the method's capability to identify minute deformations, such as 10mm-scale bulging and 20mm cracks. The robustness of the methodology was also established, showing that filtering to remove noise from the point cloud significantly enhances accuracy and that deformation extraction remains effective even when the point cloud density is reduced to one-quarter of its original through subsampling.

This developed method is applicable even with general-purpose MMS (compliant with Map Information Level 500 specifications) and is effective for screening large-area slopes and

monitoring changes before and after remedial works. By transforming hazardous on-site work into office-based data analysis, this approach facilitates data-driven preventive maintenance and represents a practical implementation of the 3D data utilization advocated by Japan's i-Construction initiative. Prospectively, it is expected to contribute to the realization of "Intelligent Maintenance" through future integration with Digital Twins and AI-powered automated deformation classification.

## 目 次

<b>第1章 序 論</b> .....	1
1.1 背景と目的 .....	1
1.2 本論文の構成 .....	3
<b>第2章 研究概要</b> .....	6
2.1 計測機器 .....	6
2.2 解析手法 .....	9
2.3 対象のり面と計測概要 .....	12
<b>第3章 Mobile Mapping Systemに関する検証</b> .....	15
3.1 MMS 計測で取得した点群精度の検証 .....	15
3.2 MMS 計測で取得した点群密度の検証 .....	30
3.3 MMS 計測で取得した点群の変状再現精度の検証 .....	33
<b>第4章 Iterative Closest Pointに関する検証</b> .....	40
4.1 のり面変状抽出の検証 .....	40
4.2 点群密度の変化によるのり面変状抽出の検証 .....	46
<b>第5章 変状抽出の検証</b> .....	62
5.1 広域のり面を対象とした変状抽出の検証 .....	62
5.2 アンカーを施したのり面を対象とした変状抽出の検証 .....	71
5.3 点群密度の異なるレーザスキャナを用いた道路周辺の変状 .....	82
5.4 MMS を使ったのり面の維持管理法実用化への検証 .....	95
<b>第6章 結 論</b> .....	97
謝 辞 .....	101
参考文献 .....	102



# 第1章 序論

## 1.1 背景と目的

日本の社会経済活動を支える基幹インフラである NEXCO 3 社が管理する高速道路網は、建設から半世紀以上が経過し、その持続可能性を揺るがす構造的な岐路に立たされている。本研究の背景には、物質的な「資産の経年による機能性の低下」と人的な「労働力の縮小」という、相互に関連し合う二重の危機が存在する。

第一に、高度経済成長期に集中的に建設された高速道路を構成する橋梁やトンネルなどの構造物は、一斉に大規模な更新・修繕の時期を迎えており、供用後 30 年を超える高速道路の割合は約 6 割に達し、供用後 40 年を超える割合も約 4 割に到達する。今後、その割合は加速度的に増加する<sup>1)</sup>（図-1.1）。この経年による性能低下は、大型車交通量の増大（図-1.2）やスパイクタイヤ使用規制の影響等による凍結防止剤散布の増大（図-1.3）といった過酷な使用環境によってさらに助長され、損傷は複雑化・深刻化し機能低下への一途をたどっている<sup>2)</sup>。この状況に対し、数兆円規模の「高速道路リニューアルプロジェクト」が進行中であるが、これは対症療法的な維持管理の限界を象徴するものである<sup>3)</sup>。

第二に、増大し続ける維持管理の需要を担うべき人的資源が、危機的な状況にある。建設・維持管理業界は、かねてより就業者の高齢化と若年層入職者の減少という構造的課題を抱えており、特に高度な診断能力を持つ熟練技術者の大量離職は、長年の経験を通じて培われた「暗黙の知識」の喪失を意味し、技術継承の断絶という深刻な事態を招くことになりかねない状況である<sup>4)</sup>。

この二重の危機に加え、従来型の点検手法そのものが持つ本質的な限界も顕在化している。高所作業車などを用いた近接目視点検（図-1.4）は、作業員の安全を脅かすだけでなく、長時間の交通規制を必須とし、深刻な交通渋滞や経済的損失を誘発する<sup>5)</sup>。さらに、点検結果が技術者の主観に左右されやすく、データの客観性や一貫性の担保が難しいという課題もある。また、従来の点検記録は損傷が発見された箇所の「点」の記録が中心であり、高速道路ネットワーク全体の健全性を時系列で定量的に評価・追跡するための網羅的なデータが不足していた。

これらの複合的な課題を克服し、持続可能な高速道路管理を実現するためには、従来の人力による点検手法かつ事後対応的なメンテナンスから、データを基盤とした客観的で予防保全的なアプローチへと、抜本的な変革が求められている。この変革を実現する鍵として、本研究では、車両で走行しながら高速道路空間全体の高精度な 3 次元データを安全かつ効率的に取得できるモバイルマッピングシステム（MMS）に着目する。

近年、構造物の形状を定量的に評価可能なレーザ点群データ（以下、点群）を取得できるレーザスキャナを用いた測量が普及している<sup>6)</sup>。点群とは、三次元座標である X, Y, Z(H) の位置情報やカメラの画像データから得た色の情報（RGB）、レーザ反射強度値の集合体である（図-1.5）。非接触による測定により、形状をデジタルデータとして保存でき、用途に応じた加工をすることができるという特徴を有する。取得した点群は一つひとつに値が与えられているため、点群を回転、拡大・縮小させ、任意の箇所を切り出すことが可能である。定量的データである点群はのり面の形状を定量的に表現できると考えられる。点群を取得することができる一般的なレーザスキャナは

固定式であり、設置箇所周辺の点群のみを取得できる（図-1.6）。そのため広域に施工されたのり面などの構造物を計測する際には、数回にわたり設置箇所を変更しなければならない。そこで本研究では点群を広域かつ効率的に取得できる車載写真レーザ測量（Mobile Mapping System, 以下 MMS）（図-1.7）を使用した。MMSによる計測は道路を普通走行することで車両周囲の点群を取得できるというセンシング機器である。MMS計測によって取得された時期の異なる2つの点群をIterative Closest Point（以下、ICP）アルゴリズムを応用した解析手法により2時間間の変状抽出を試みる。

本研究は、i-Construction 2.0が掲げる建設生産システム全体の効率化に貢献するため、維持管理段階における3次元データ活用の可能性を検討するものである。特に、維持管理段階においては、既存の構造物の3次元データをベースとした変状把握が重要であり、本研究で提案するMMSとICPを組み合わせた手法は、その基盤となる技術となりうる。

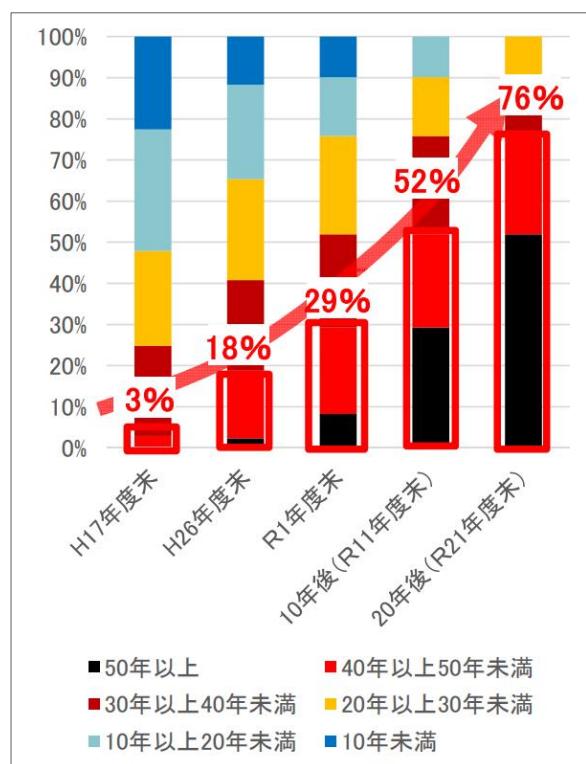


図- 1.1 高速道路の経過年数の推移  
(NEXCO3社が管理する高速道路)。（出典：令和3年1月20日「社会資本整備審議会 道路分科会 第47回国土幹線道路部会」資料4より）

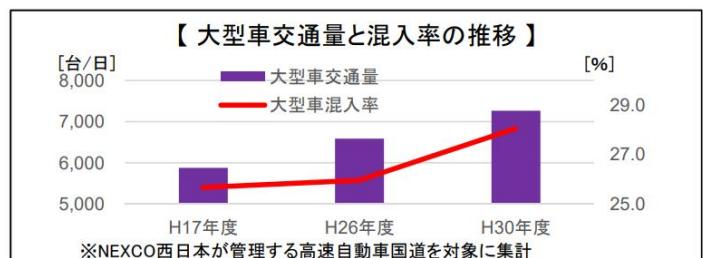


図- 1.2 大型車交通量と混入率の推移。（出典：令和3年1月20日「社会資本整備審議会 道路分科会 第47回国土幹線道路部会」資料4より）



図- 1.3 NEXCO3会社が管理する高速道路（積雪寒冷地）における凍結防止剤散布状況。（出典：令和3年1月20日「社会資本整備審議会 道路分科会 第47回国土幹線道路部会」資料4より）

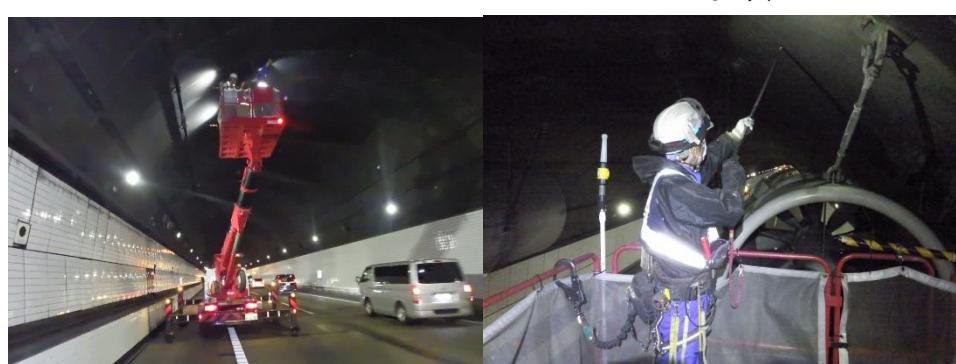


図- 1.4 高所作業車を使用した近接目視点検状況写真

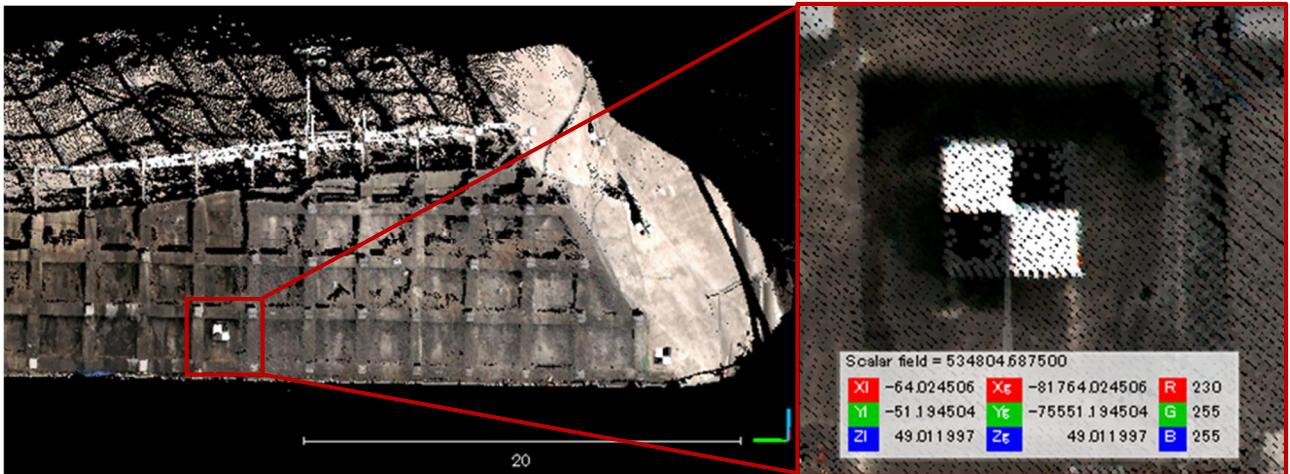


図- 1.5 のり面の点群（赤枠内は左の点群から抽出したのり枠の点群）



図- 1.6 固定式レーザスキャナを用いて点群を取得している様子（参考：株式会社山陽測器）



図- 1.7 MMS を用いてのり面点群を取得している様子

本研究では MMS を使用してのり面の点群を取得し、解析を行なうことで変状の抽出を試みた。その際に使用する機器・手法である MMS 測量と ICP 手法の精度を検証する。また解析の妨げになると考えられる箇所ののり面点群を除去するフィルタリングを行なった点群で同様に解析を行なう。これらの手法によって 2 時期間ののり面の変状が抽出できるかを検証する。その結果より、本手法がのり面点検における点検補助として、全体から異常を抽出するスクリーニング手法として、活用できるかを考察する。

## 1.2 本論文の構成

本研究の内容を各章ごとに概説する（図-1.6）。

第 1 章では、本研究の背景と目的において、日本ののり面の現状、変状検出の重要性について述べ、現在ののり面点検に問題点があることを説明した。3 次元座標という定量的な情報を持つ点群を取得できる車載写真レーザ測量（MMS）とその点群を用いて変状を表現できると考えられる ICP アルゴリズムを応用した手法を用いることでのり面点検の補助となりえることを述べる。

第 2 章では、MMS 計測、ICP 手法、のり面計測の概要について説明する。

第 3 章では、Mobile Mapping System に関する検証を行なう。MMS 計測で取得され

る点群は MMS 車両の走行速度, 点群補正を行なう際の基準点の数量と有無, 衛星配置によって精度が上下すると考えられる. MMS 計測で取得される点群の精度に関わる 3 つの検証を行なう. 続いて, 点群密度, クラックなどの変状の再現に必要となる変状再現性の検証を行ない, 考察する.

第 4 章では, Iterative Closest Point に関する検証を行なう. MMS 計測で取得した点群を使用して ICP 手法がどの程度の変状を抽出できるかを検証する. 様々な変状を模した供試体をのり面上に設置して, 本解析手法が抽出できる変状の規模を確認する. その際にのり面の点群上に存在する解析に用いない点群を除去するフィルタリングを行ない, 変状抽出精度が向上するかを検証する. また点群の間引きを行なうことで点群密度を変化させ, どの程度の点群密度で変状を抽出できるかを併せて検証する.

第 5 章では, 第 3, 4 章の内容を踏まえ, 広域のり面を対象とした変状抽出の検証を行なう.

第 6 章では, 本研究対象ののり面にアンカー施工を行なった後の MMS 計測で取得した点群を使用して, 変化を確認できるかを検証する.

第 7 章では, 道路周辺を対象として, 点群密度・分布の異なるレーザスキャナを搭載した MMS 車両で取得した点群が ICP 手法によって変状を抽出できるかを検証する.

第 8 章では, i-Construction の取り組みが進められていることから, 維持管理段階での 3 次元データの活用による同様の効果が期待されていることに関して, 汎用 MMS を使用して「移動計測車両による測量システムを用いる数値地形図データ作成マニュアル（案）」（平成 24 年国土交通省国土地理院, 以下 MMS マニュアル）に基づいたレベル 500 を満たす詳細度の標準仕様を満足するか検証をする.

第 9 章では, 本研究の要約を行ない, 結論とともに今後の課題を述べる.

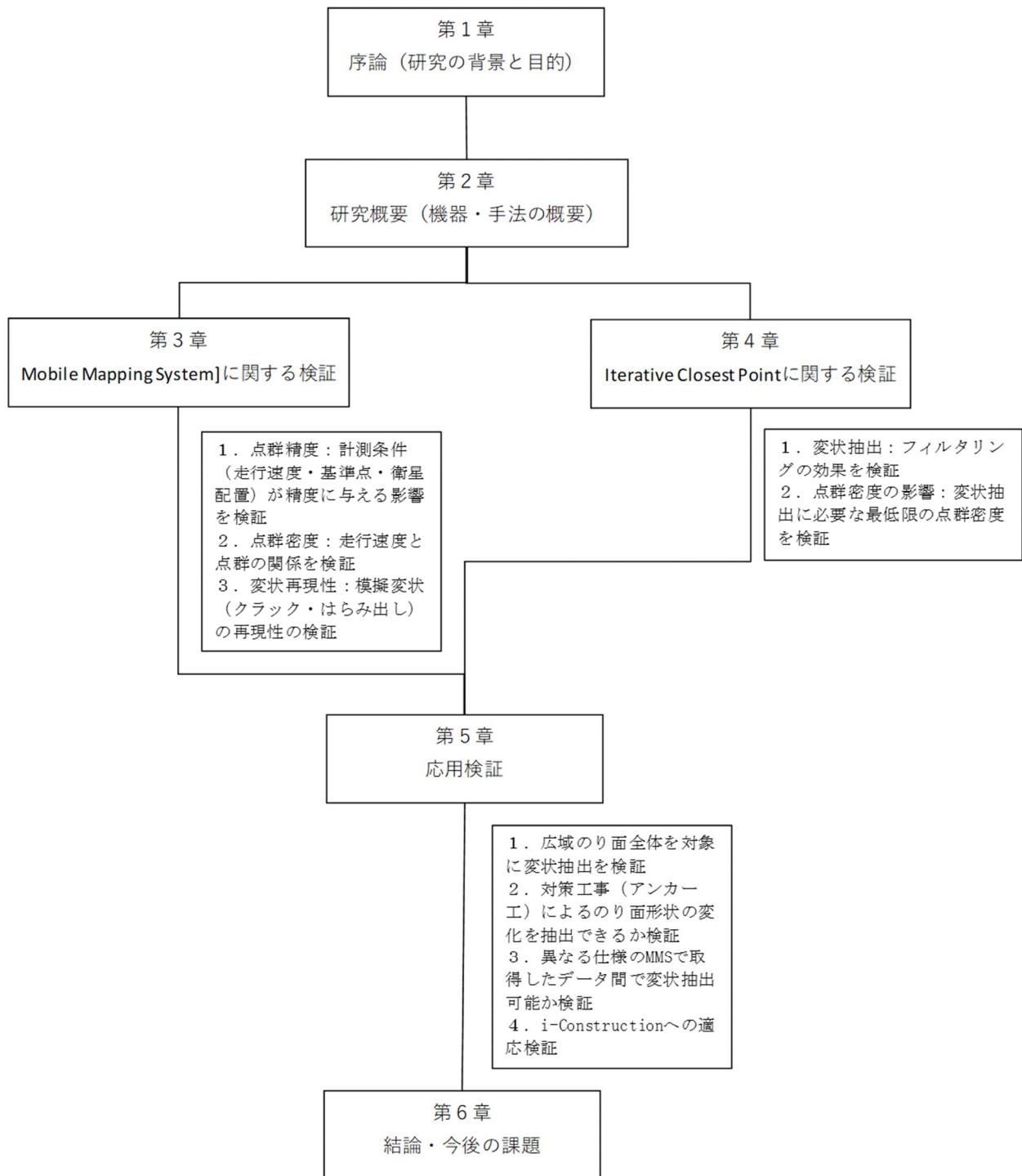


図- 1.6 本論文の構成

## 第2章 研究概要

本章では、本研究に用いた計測機器の MMS、変状を抽出するための解析手法である ICP アルゴリズム、研究対象としたのり面とその計測方法について説明する。

### 2.1 計測機器

車載写真レーザ測量 (MMS) とトータルステーション (TS) の 2 つの機器について説明する。

#### (1) Mobile Mapping System

のり面の点群取得に車載写真レーザ測量 (Mobile Mapping System, MMS) を使用した。MMS とは車両が走行しながら連続的に高精度の点群が迅速に取得できるセンシング機器である (図-2.1)。MMS のシステムは車両位置姿勢を計測するための GNSS (Global Navigation Satellite System), IMU (Inertial Measurement Unit), オドメトリ複合航法システムと車両周辺の情報を取得する部分の 2 つに大別することができる。前者のために GPS, IMU, オドメーターを有し、後者のためにレーザスキャナ、カメラを有している。これらにより正確な道路周辺のレーザ点群データ (3 次元情報) を取得できる。一般に MMS の計測は取得した 3 次元レーザ点群の位置を MMS 車両の位置と姿勢によって算出される。そのため自己位置の精度が取得するレーザ点群の位置精度に大きな影響を及ぼす。MMS 車両の自己位置は電子基準点などの固定局の位置を基準として GNSS 測位によって求められる。現在、MMS は道路施設の 3 次元地形図作成<sup>7)</sup>をはじめ、河川堤防計測<sup>8)</sup>、道路維持管理<sup>9)</sup>などで活用されている。

本研究において、MMS を使用した理由を述べる。点群を取得する計測方法として、固定式のレーザスキャナによる計測方法やドローンを代表とする無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) による計測方法<sup>6)</sup> などが挙げられる。前者でのり面全面を計測する場合、計測範囲がレーザスキャナの周囲のみであるため、車や木などの障害物によって点群取得が遮られ、何度も置き換えて計測する必要がある。そして、対象ののり面は急傾斜なものであるため、のり面に対して垂直に点群を得られる MMS を使用した。

本研究の MMS では、車外に計測用ポット (レーザスキャナ, GNSS アンテナ 2 機, 400 万画素スポットカメラ 8 台), 走行距離計, 慣性計測装置, 車内には解析ソフトとして InertialExolorer, Radmin, AutoP をそれぞれ一式搭載した MMS 車両を使用した。レーザスキャナは位相差式であり、1 秒間に 100 万点スキャンできるものを使用した。

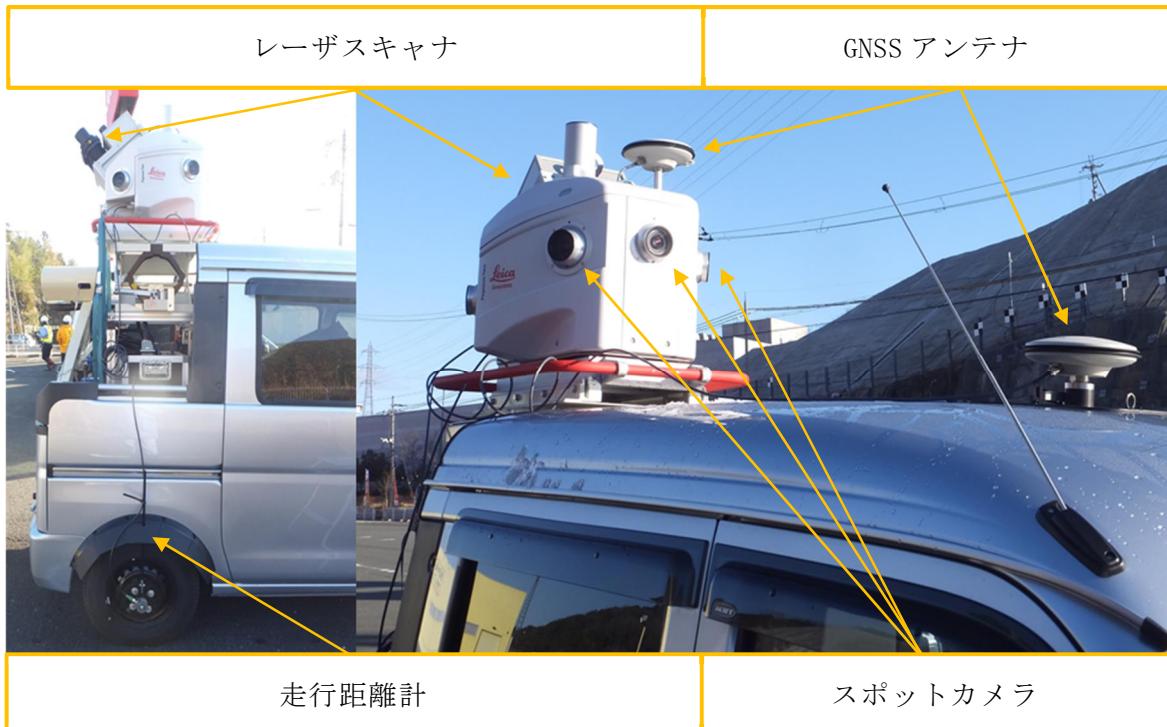


図- 2.1 MMS 車両に搭載した機器

## (2) Total Station

本研究で使用したトータルステーション (Total Station, 以下 TS) について説明する (図-2.2). MMS 計測の精度検証や取得した点群の位置補正のため, のり面に設置したターゲットの中心座標を求める必要がある. そこで TS を使用する. TS とは, 電子セオドライトと光波測距儀を一体化し, 1 つの望遠鏡で観測と光の送受光を可能とした電子式測距角儀である. MMS 計測と TS 計測は計測方法に違いがある. 前者の計測方法は移動をしながら複数の点を取得することに対して, 後者は固定された状態で 1 点の座標を取得する. そのため, 点群精度の検証をする際は TS 計測で得たデータを真値として扱う.

本研究で行なった TS 計測の手順を述べる. GNSS 測量機により, のり面の両端付近の 2 か所で 2 時期間のスタティック測量を行なう (図-2.3). スタティック測量とは, 複数の観測点に GNSS 測量機を設置して, 同時に GNSS 衛星からの信号を受信して, 自己位置を取得する測量法である<sup>7)</sup>. GNSS 基準点 1, 2 を設置し, スタティック測量によってそれぞれの座標値を取得する. そして基準点を取得した後に後方公会法により, TS の設置位置を観測する (図-2.4, 図-2.5). その際は放射法で, かつ対回観測を行なうことで誤差の低減に努めた. TS の設置位置の観測は 1, 2 時期の両時期で行なうが, 2 時期目の基準点は 1 時期目に作成したものを使用する.



図- 2.2 TS を用いた計測の様子



図- 2.3 GNSS 受信機を用いたスタティック測量



図- 2.4 のり面と 2 つの GNSS 基準点, TS 設置位置の関係 (背景: 国土地理院)



図- 2.5 TS によるターゲットの計測の様子

## 2.2 解析手法

続いて、変状を抽出するために使用した Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズムについて説明する。ICP アルゴリズムとは SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) と呼ばれる自己位置推定と地図構築を同時に行なうスキャンマッチングアルゴリズムの 1 つを応用した手法である<sup>8)</sup>。スキャンマッチングとは、2 つの点群の形状が合致するように位置合わせをする技術のことである。ICP は 2 つのスキャン（現在スキャンと参照スキャン）の間でスキャン点の対応付けと位置の最適化を交互に繰り返すことで点群のマッチングを繰り返す方法である。つまり ICP とは 2 つの点群が整合するように、位置姿勢の関係を調整する手法の一つである。繰り返し計算に基づいて、段階的に位置姿勢を調整する。ICP アルゴリズムによる点群マッチングの過程について、データの対応付け、最適化位置の推定、繰り返しの 3 段階に分けて説明する。ICP アルゴリズムは繰り返し計算であるため、その繰り返し数を  $k$  で表し、 $k$  回目の繰り返しにおいて最適化した位置を  $x_t^k$  で表す。

まずはデータの対応付けについて述べる。 $k-1$  回目の繰り返しでの位置  $x_t^{k-1}$  において、スキャン  $S_t$  の点とスキャン  $S_{t-1}$  の点を対応付ける。まず  $k$  回目の位置  $x_t^k$  が得られたとして、その位置での現在の各スキャン点  $p_t^k$  は次の式で計算される。 $R^k$  は  $x_t^k$  の回転ベクトルであり、 $t^k$  は  $x_t^k$  の並進ベクトルである。

$$p_i^k = R^k p_i + t^k \quad (1)$$

次に  $p_i^k$  から最も近い参照スキャン  $S_{t-1}$  の点  $q_i^k$  を次の式で求める。

$$q_{ji}^k = \operatorname{argmin} \|p_i^k - q_i^k\| \quad (2)$$

ICP のデータ対応付けの基準はユークリッド距離を用いる。すなわち、ユークリッド距離が近い点同士を近づけている。 $\operatorname{argmin} = f(x)$  は  $f(x)$  を最小にする  $x$  を表す関数である。この式(2)から  $p_i^k$  からのユークリッド距離が最も小さくなる点を探して  $q_{ji}^k$  とする。ここで  $j_i$  はスキャン  $S_t$  の点番号  $i$  に対応するスキャン  $S_{t-1}$  の点番号  $j$  を表す。対応付けの結果は、 $S_t$  と  $S_{t-1}$  の各点番号のペアの集合  $C_k = \{(1, j_1), \dots, (N, j_N)\}$  で表す。ただし、 $N$  は点の個数である。

続いて、最適化位置の推定を行なう。データの対応付けにおいて、コスト関数が最小となる  $x_t^k$  を求める。(3)の式で各点間の距離の二乗平均を求める。コスト関数とは、その入力値がよい値かどうかを評価する関数であり、このアルゴリズムではコスト関数が最小（極小）となる入力が最も良いとされるようにする。ICP におけるコスト関数は位置  $x^t$  を入力して、対応付けされた転換の位置誤差の平均を返す関数  $G_1(x_t^k)$  である。つまり、2 つのスキャンのずれ（各点の位置誤差）が小さいほど尤もらしい位置だと判断する。位置の推定では  $G_1(x_t^k)$  が最小となる  $x_t^k$  を求める。

$$G_1(x_t^k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \| (R^k p_i + t^k) - q_{j1}^{k-1} \|^2 \quad (3)$$

最後に繰り返しについて述べる。位置合わせのスコアが変化しなくなるまで、データの対応付けと最適化位置の推定を行なう。 $k$  回目の  $G_1(x_t^k)$  の最小値と  $k-1$  回目の  $G_1(x_t^{k-1})$  の最小値の差が閾値以下になったら繰り返しを終了する（図-2.6）。

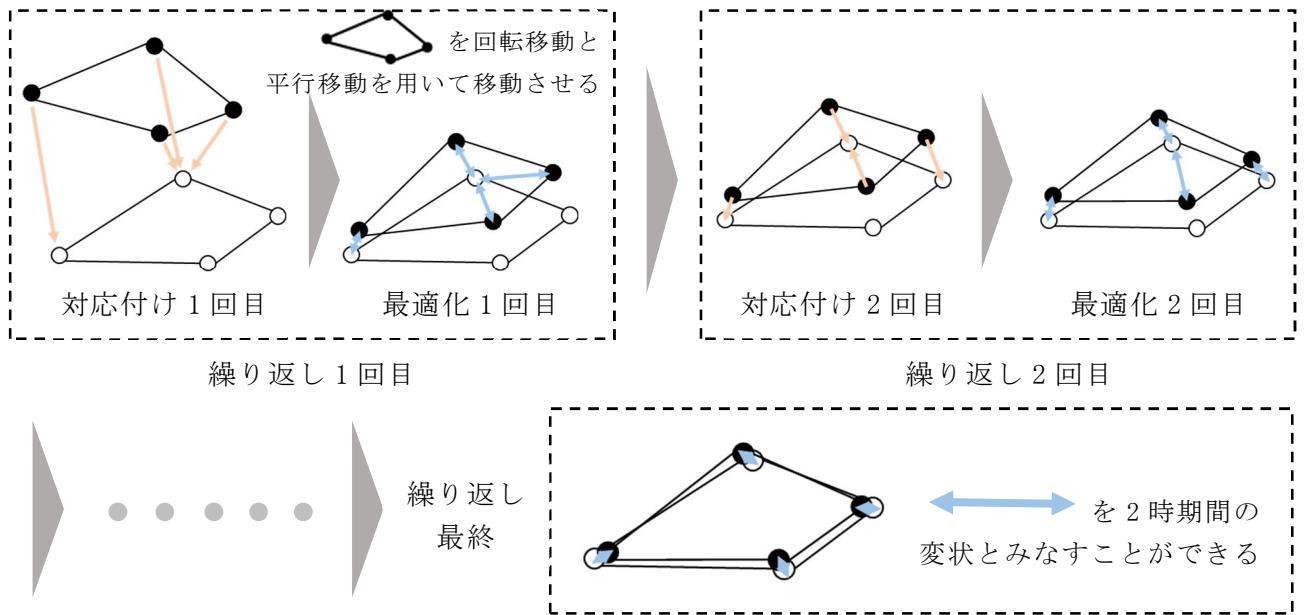


図- 2.6 ICP アルゴリズムによる変状量算出の仕組み。黒丸が 1 時期目の点群、白丸が 2 時期目の点群。最適化の際には回転移動と平行移動が行われている。

次に ICP アルゴリズムによる変位量抽出について述べる。ICP は近傍点を対応付けから最適化を行なう過程で、点の移動が回転移動と平行移動の行列で算出されるため、点の移動をベクトルで表すことができる。このベクトルを応用し、MMS で計測した 2 時期の点群データに対して ICP アルゴリズムを適用すると、2 時期で動いていない点については移動量が算出されないが、動いた点については点の移動を向きと量で算出することができるため、この移動量を変位量とみなすことができる。

点群に対して ICP アルゴリズムで変位量抽出を行なう際、全点群に対して点群マッチングを行なうのではなく、正方形の範囲に区切ったメッシュごとに解析を行なう。そしてメッシュ内の点群の移動量と向きの平均値を用いて、変位ベクトルを算出する（図-2.7）。このメッシュの大きさをメッシュサイズと定義する。またメッシュについて点群マッチングを行なう際、どの点群までをマッチングの対象とするか決める必要がある。この範囲をブロックレンジと定義する（図-2.8）。

以上の結果、2 時期間の点群の変化量をベクトルで検出できると考えられる手法である。

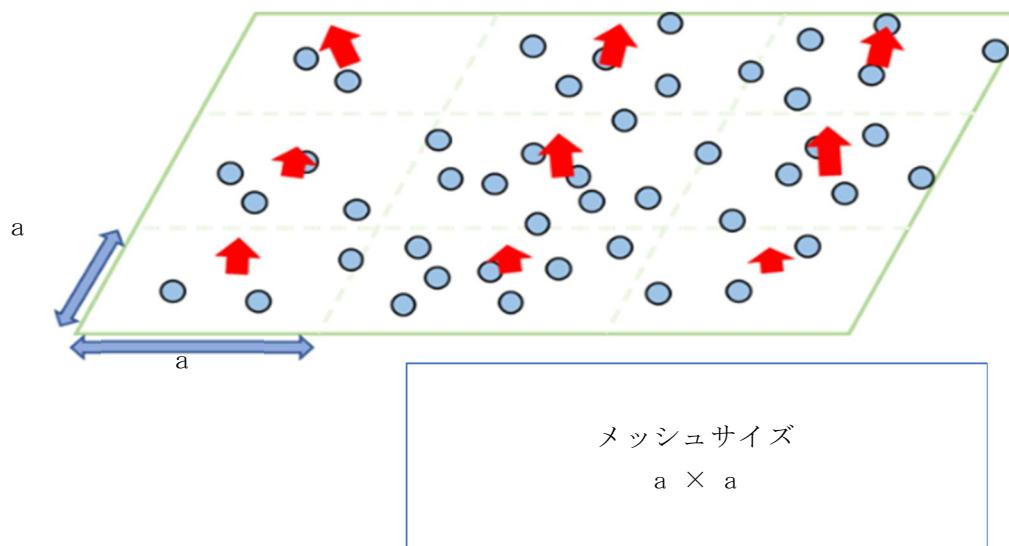


図- 2.7 ICP 手法における  
 メッシュサイズ

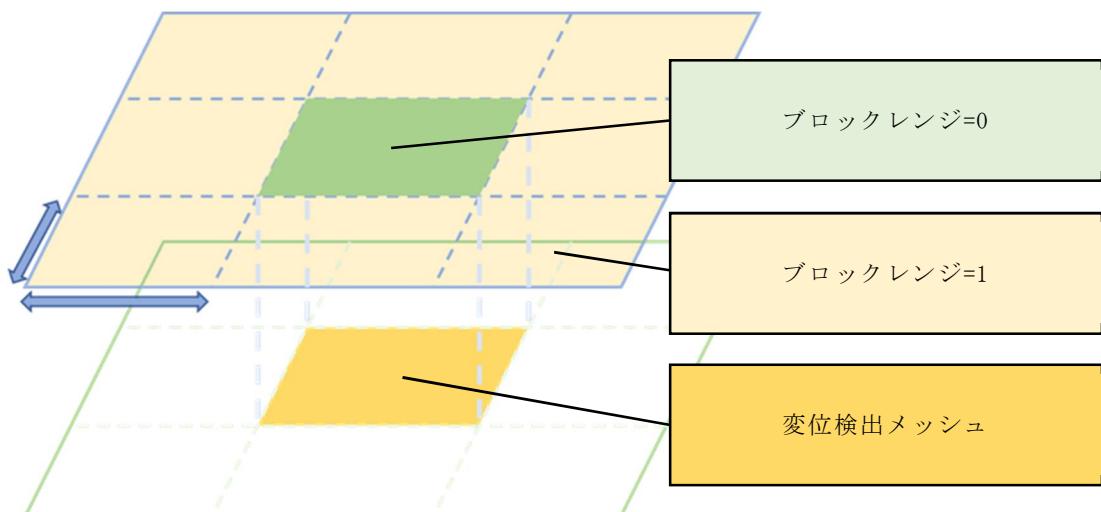


図- 2.8 ICP 解析におけるブロックレンジ

## 2.3 対象のり面と計測概要

本研究の計測条件の対象としたのり面と計測条件について説明する。

まずは点群を取得し、変状を抽出する対象であるのり面について述べる。計測対象としたのは国道9号沿いの全長約70m、高さ約10mののり枠付きのり面である（図-2.9）。

のり面上には1辺0.7mの合計14点のターゲットを設置した（図-2.10, 図-2.11）。そのうちの8点を調整用基準点（TG）としてのり面全面を囲むように（図-2.12）、6点を検証点（KS）として変動の恐れのあるのり面側に設置した。調整用基準点（TG）とは取得した点群全体のずれを補正するために使用する点のことである。MMS計測で取得したTGの座標をTSで取得した座標に変換することで点群全体のひずみを補正する<sup>10)</sup>。本検証ではのり面上に設置したターゲットとは別に道路上の特徴点を4点、調整用基準点（C）として選定し（図-2.13, 図-2.14）、のり面上に設置した調整用基準点（TG）と補正の精度を比較する。本検証で使用する点群は特に断りがない限りは補正を行なった点群を使用するものとする。検証点（KS）とは、実際ののり面が変動しているか、TSで取得した座標とMMS計測で取得した座標の差を比較し、精度を検証するための点である。のり面上に設置するTGとKSのターゲットは強風などによる脱落の恐れがないよう、落石防護柵の支柱やのり枠内の吹付コンクリート面にアンカー打設やボルト締めで固定する。

続いてMMS計測時の条件について述べる。本研究では特に断りがない限りでは以下の通り、MMS計測を行なった。計測の1時期目を2018年1月13日、2時期目を同年の5月28日として、約4か月の期間を空けて、計測を行なった。MMS車両は対象のり面との距離が12mである走行車線②を走行して、のり面の点群を取得した（図-2.15, 図-2.16）。また画像データの視認性向上のため、計測実施時間は太陽高度を考慮し、逆光及びハレーションなどが極力低減するように撮影する。斜面変動方向のり面付近は植生の除去を行なうなどのり面遮蔽物を可能な限り減らし良好なデータ取得環境を形成する。



図- 2.9 計測対象としたのり枠付きのり面



図- 2.10 ターゲット  
(1辺が 0.7m の板)

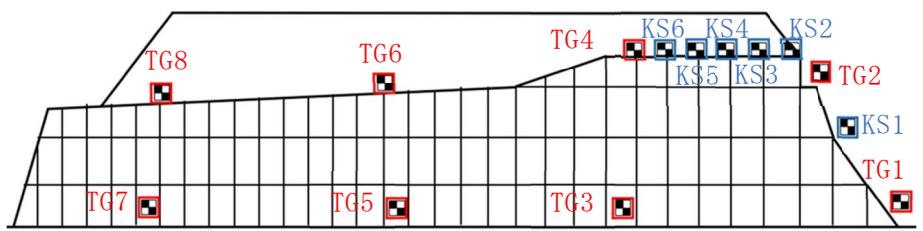


図- 2.11 のり面上に設置したターゲット一覧  
調整用基準点 (TG) は 8 点, 検証点 (KS) は 6 点

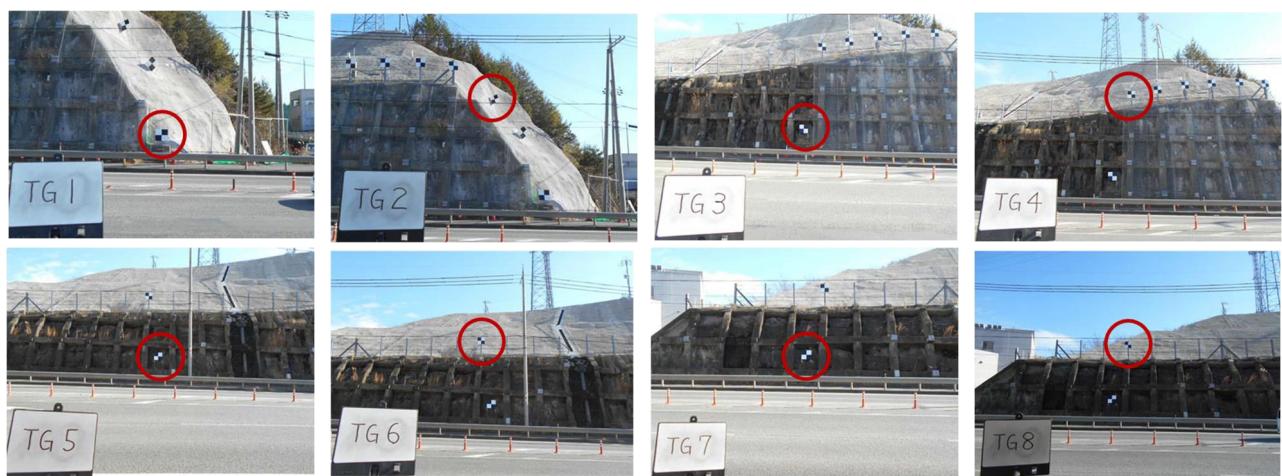


図- 2.12 のり面上に設置した調整用基準点 (TG) 8 点



図- 2.13 道路上に設置した調整用基準点 (C) 4 点

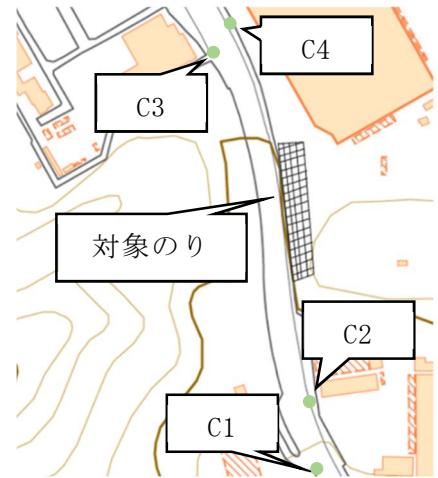


図- 2.14 道路上に設置した調整用基準点 (C) の設置位置  
(背景 : 国土地理院)

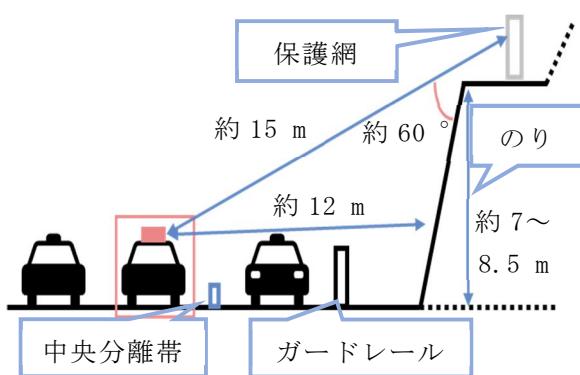


図- 2.15 計測時の MMS 車両と対象のり面の関係 (図解)



図- 2.16 計測時の MMS 車両と対象のり面の関係 (写真)

## 第3章 Mobile Mapping Systemに関する検証

本章では、MMS 計測が取得する点群の特徴についての検証を行なう。着目する点は、点群精度、点群密度、変状再現性の 3 点である。それらについて合計 5 つの検証を行なう。

### 3.1 MMS計測で取得した点群精度の検証

MMS 計測で取得される点群の精度を検証する。MMS 計測で取得された点群は大別して 2 種類の誤差を持つ。1 つは MMS に搭載されたレーザスキャナや走行距離計などの機械による誤差であり、2 つ目は計測時の気候や衛星などによる誤差である。本節では、第 2 章で紹介した MMS 車両のみを点群取得に用いるため、後者の誤差を本章にて検証する。

本検証では、MMS の走行速度、調整用基準点の数量、衛星配置による点群が精度に与える影響を検証する。その後、MMS 計測の点群取得精度はどの条件の場合、最も向上するかを考察する。

MMS 計測で取得した点群のターゲット中心座標は、フリーソフトである CloudCompare<sup>11)</sup>を用いて取得した。MMS 計測と TS 計測で取得された X, Y, Z の座標値（図-3.1）は平面直角座標系の VI 系<sup>12)</sup>で表す。MMS 計測と TS 計測の比較結果は、平均較差と RMS 誤差（二乗平均平方根誤差）で表す。平均較差は MMS 計測と TS 計測で得た座標の差を表し、RMS 誤差は点群の X, Y, Z 方向のそれぞれの差分を最確値としたばらつきを示す。地面と水平の平面である XY 平面とのり面の高さ方向である Z 方向で比較した、MMS の平均較差と RMS 誤差を以下の式で表す。

$$DIS = OBS - TV \quad (4)$$

$$\overline{DIS} = \frac{(\sum DIS)}{n} \quad (5)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{(\sum DIS^2)}{n}} \quad (6)$$

ここで、DIS : 較差、OBS : 観測値、TV : 真値、 $\overline{DIS}$  : 較差の平均値、n : 検証点数、RMS : 二乗平均平方根誤差とし、RMS 誤差を MMS 計測の誤差とする。この(4), (5), (6)の式を MMS 計測の精度検証にて用いる。それぞれの要素毎の検証を行なう前に 2 時期間のスタティック測量と TS 計測の座標値を示す。表-3.1 はスタティック測量を行ない、取得した 2 時期間の C4 点と GNSS 基準点 4 点、TS 設置点の座標値とその較差を表した表である。表-3.2 は TS 計測によって取得された 2 時期間の TG 8 点、KS 6 点のターゲットの中心座標とその較差である。TS 計測で得た 2 時期間の較差は X, Y 方向で 3 mm 以下、高さ方向（Z 方向）で 2 mm 以下である。本検証での TS 機械精度は観測距離が 30~100 m の場合、±2.2 mm であるため、2 時期の較差はこの TS 機械精

度程度であり、変状に対応する有意な変化は生じていないと評価して、検証を行なう。

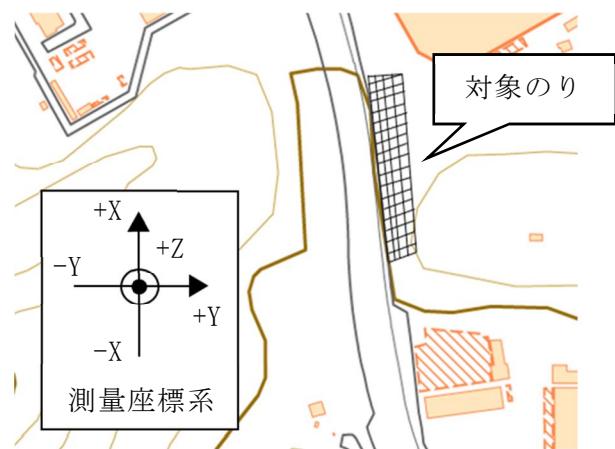


図- 3.1 対象のり面の測量座標系（背景：地理院地図）

表- 3.1 GNSS 測量機によるスタティック測量で取得した C4 点と GNSS 基準点 2 点,  
TS 設置点の座標値とその較差 (単位は m)

	TS 計測 1 時期目			TS 計測 2 時期目			較差 (2 時期目-1 時期目)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
C1	-75672.698	-81747.756	40.400	-75672.694	-81747.757	40.402	0.004	-0.001	0.002
C2	-75634.929	-81752.094	42.162	-75634.927	-81752.094	42.164	0.002	0.000	0.002
C3	-75426.606	-81810.591	49.188	-75426.607	-81810.587	49.185	-0.001	0.004	-0.003
C4	-75421.887	-81796.282	49.535	-75421.886	-81796.278	49.535	0.001	0.004	0.000
GNSS 基準点 1	-75615.386	-81773.663	44.120	-75615.386	-81773.663	44.120	0.000	0.000	0.000
GNSS 基準点 2	-75460.249	-81797.344	48.685	-75460.249	-81797.344	48.685	0.000	0.000	0.000
TS 設置点	-75561.820	-81784.723	46.465	-75561.820	-81784.723	46.465	0.000	0.000	0.000

表- 3.2 2 時期間の TS 計測で取得した TG8 点と KS6 点の座標値とその較差 (単位は m)

	TS 計測 1 時期目			TS 計測 2 時期目			較差 (2 時期目-1 時期目)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
TG1	-75571.366	-81762.234	47.439	-75571.367	-81762.235	47.437	-0.001	-0.001	-0.002
TG2	-75568.179	-81755.960	55.660	-75568.181	-81755.961	55.658	-0.002	-0.001	-0.002
TG3	-75551.204	-81764.020	48.984	-75551.203	-81764.020	48.982	0.001	0.000	-0.002
TG4	-75552.577	-81761.654	56.565	-75552.576	-81761.651	56.563	0.001	0.003	-0.002
TG5	-75531.315	-81766.015	49.703	-75531.312	-81766.015	49.702	0.003	0.000	-0.001
TG6	-75530.109	-81762.793	55.972	-75530.110	-81762.790	55.970	-0.001	0.003	-0.002
TG7	-75506.801	-81768.526	50.352	-75506.800	-81768.526	50.352	0.001	0.000	0.000
TG8	-75507.594	-81764.756	56.139	-75507.591	-81764.753	56.140	0.003	0.003	0.001
KS1	-75570.418	-81758.332	52.236	-75570.419	-81758.333	52.234	-0.001	-0.001	-0.002
KS2	-75565.143	-81760.042	57.327	-75565.144	-81760.043	57.325	-0.001	-0.001	-0.002
KS3	-75562.682	-81760.481	57.500	-75562.684	-81760.480	57.500	-0.002	0.001	0.000
KS4	-75560.092	-81760.852	57.429	-75560.094	-81760.851	57.429	-0.002	0.001	0.000
KS5	-75557.592	-81761.159	57.314	-75557.594	-81761.158	57.315	-0.002	0.001	0.001
KS6	-75555.039	-81761.428	56.932	-75555.040	-81761.428	56.931	-0.001	0.000	-0.001

## (1) MMS車両の走行速度変化による点群の精度検証

MMS 車両の走行速度を変化させることで、取得される点群の精度がどのように変化するかを検証する。MMS 車両の走行は 40 km/h, 50 km/h の 2 パターンで実施する。計測値の呼称として、MMS 計測結果の 2 時期目の座標から 1 時期目の座標を引いた値を相対較差、それぞれの時期で MMS 計測結果から TS 計測結果を引いた値を絶対較差とする。較差の結果から平均値、RMS 誤差、最大値を求める。最大値は較差の中から絶対値として最も大きな値を採用する。**表-3.3**, **表-3.5** は MMS 車両が 40, 50 km/h で走行し、取得した KS 中心座標と TS 計測の結果、その較差を示している。その結果を**表-3.4**, **表-3.6** にまとめている。 $\Delta XY$  は地面に対して水平方向との誤差、 $\Delta Z$  は標高の誤差を示す。

40 km/h で走行して取得した MMS 計測結果について述べる。相対較差は  $\Delta XY$  で 27 mm,  $\Delta Z$  で 17 mm, 絶対較差は  $\Delta XY$  で 16 mm,  $\Delta Z$  で 18 mm であった。また、それぞれの較差の  $\Delta X$ ,  $\Delta Z$  の値より、MMS 計測で取得した点群全体は一定の方向に誤差を含んでいることが分かる。

50 km/h で走行して取得した MMS 計測結果について述べる。相対較差は  $\Delta XY$  で 14 mm,  $\Delta Z$  で 7 mm, 絶対較差は  $\Delta XY$  で 14 mm,  $\Delta Z$  で 31 mm であった。40 km/h で走行した際の結果同様に、MMS 計測で取得した点群が一定方向に誤差を含む、系統誤差を含んでいることが分かる。

表- 3.3 40 km/h で走行した MMS 計測と TS 計測の絶対較差 (単位は m)  
較差の欄には絶対値の最大値である±0.079 に近い値ほど色を濃く表示している

	MMS 計測 (40 km/h) 1 時期目			MMS 計測 (40 km/h) 2 時期目			相対較差 (2 時期目-1 時期目)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	Δ X	Δ Y	Δ Z
KS1	-75570.438	-81758.341	52.229	-75570.424	-81758.339	52.277	0.014	0.003	0.048
KS2	-75565.153	-81760.037	57.343	-75565.174	-81760.017	57.363	-0.021	0.021	0.020
KS3	-75562.675	-81760.503	57.520	-75562.691	-81760.424	57.540	-0.016	0.079	0.020
KS4	-75560.100	-81760.852	57.445	-75560.108	-81760.842	57.484	-0.008	0.009	0.039
KS5	-75557.627	-81761.157	57.345	-75557.633	-81761.134	57.353	-0.007	0.022	0.008
KS6	-75555.046	-81761.409	56.938	-75555.037	-81761.411	56.945	0.009	-0.003	0.007
	TS 計測 1 時期目			MMS 計測 (40 km/h) 1 時期目			絶対較差 (MMS-TS) 1 時期目		
	X	Y	Z	X	Y	Z	Δ X	Δ Y	Δ Z
KS1	-75570.418	-81758.332	52.236	-75570.438	-81758.341	52.229	-0.020	-0.009	-0.007
KS2	-75565.143	-81760.042	57.327	-75565.153	-81760.037	57.343	-0.010	0.005	0.016
KS3	-75562.682	-81760.481	57.500	-75562.675	-81760.503	57.520	0.007	-0.022	0.020
KS4	-75560.092	-81760.852	57.429	-75560.100	-81760.852	57.445	-0.008	0.000	0.016
KS5	-75557.592	-81761.159	57.314	-75557.627	-81761.157	57.345	-0.035	0.002	0.031
KS6	-75555.039	-81761.428	56.932	-75555.046	-81761.409	56.938	-0.007	0.019	0.006
	TS 計測 2 時期目			MMS 計測 (40 km/h) 2 時期目			絶対較差 (MMS-TS) 2 時期目		
	X	Y	Z	X	Y	Z	Δ X	Δ Y	Δ Z
KS1	-75570.419	-81758.333	52.234	-75570.424	-81758.339	52.277	-0.005	-0.006	0.043
KS2	-75565.144	-81760.043	57.325	-75565.174	-81760.017	57.363	-0.030	0.026	0.038
KS3	-75562.684	-81760.480	57.500	-75562.691	-81760.424	57.540	-0.007	0.056	0.040
KS4	-75560.094	-81760.851	57.429	-75560.108	-81760.842	57.484	-0.014	0.009	0.055
KS5	-75557.594	-81761.158	57.315	-75557.633	-81761.134	57.353	-0.039	0.024	0.038
KS6	-75555.040	-81761.428	56.931	-75555.037	-81761.411	56.945	0.003	0.017	0.014

表- 3.4 40 km/h で走行した MMS 計測の較差の平均値, 絶対値の最大値, RMS 誤差 (単位は m)

	40 km/h の MMS 計測の相対較差 (2 時期目-1 時期目)			40 km/h の MMS 計測の絶対較差 (1 時期目と 2 時期目)		
	Δ XY	Δ Z	Δ XY	Δ Z		
平均値	0.028	0.024	0.025	0.026		
絶対値の最大値	0.081	0.048	0.057	0.055		
RMS 誤差	0.027	0.017	0.016	0.018		

表- 3.5 50 km/h で走行した MMS 計測と TS 計測の絶対較差 (単位は m)  
較差の欄には絶対値の最大値である±0.068 に近い値ほど色を濃く表示している

	MMS 計測 (50 km/h) 1 時期目			MMS 計測 (50 km/h) 2 時期目			相対較差 (2 時期目-1 時期目)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	Δ X	Δ Y	Δ Z
KS1	-75570.452	-81758.341	52.264	-75570.419	-81758.377	52.210	0.033	-0.037	-0.053
KS2	-75565.162	-81760.029	57.361	-75565.146	-81760.062	57.293	0.016	-0.033	-0.067
KS3	-75562.677	-81760.468	57.519	-75562.690	-81760.480	57.463	-0.014	-0.012	-0.056
KS4	-75560.097	-81760.836	57.451	-75560.078	-81760.883	57.399	0.019	-0.048	-0.052
KS5	-75557.609	-81761.129	57.333	-75557.584	-81761.170	57.265	0.025	-0.041	-0.068
KS6	-75555.066	-81761.404	56.952	-75555.040	-81761.451	56.895	0.026	-0.047	-0.057
	TS 計測 1 時期目			MMS 計測 (50 km/h) 1 時期目			絶対較差 (MMS-TS) 1 時期目		
	X	Y	Z	X	Y	Z	Δ X	Δ Y	Δ Z
KS1	-75570.418	-81758.332	52.236	-75570.452	-81758.341	52.264	-0.034	-0.009	0.028
KS2	-75565.143	-81760.042	57.327	-75565.162	-81760.029	57.361	-0.019	0.013	0.034
KS3	-75562.682	-81760.481	57.500	-75562.677	-81760.468	57.519	0.005	0.013	0.019
KS4	-75560.092	-81760.852	57.429	-75560.097	-81760.836	57.451	-0.005	0.016	0.021
KS5	-75557.592	-81761.159	57.314	-75557.609	-81761.129	57.333	-0.017	0.030	0.019
KS6	-75555.039	-81761.428	56.932	-75555.066	-81761.404	56.952	-0.027	0.024	0.020
	TS 計測 2 時期目			MMS 計測 (50 km/h) 2 時期目			絶対較差 (MMS-TS) 2 時期目		
	X	Y	Z	X	Y	Z	Δ X	Δ Y	Δ Z
KS1	-75570.419	-81758.333	52.234	-75570.419	-81758.377	52.210	0.000	-0.044	-0.024
KS2	-75565.144	-81760.043	57.325	-75565.146	-81760.062	57.293	-0.002	-0.019	-0.032
KS3	-75562.684	-81760.480	57.500	-75562.690	-81760.480	57.463	-0.006	0.000	-0.037
KS4	-75560.094	-81760.851	57.429	-75560.078	-81760.883	57.399	0.016	-0.032	-0.030
KS5	-75557.594	-81761.158	57.315	-75557.584	-81761.170	57.265	0.010	-0.012	-0.050
KS6	-75555.040	-81761.428	56.931	-75555.040	-81761.451	56.895	0.000	-0.023	-0.036

表- 3.6 50 km/h で走行した MMS 計測の較差の平均値, 絶対値の最大値, RMS 誤差 (単位は m)

	50 km/h の MMS 計測の相対較差 (2 時期目-1 時期目)		50 km/h の MMS 計測の絶対較差 (1 時期目と 2 時期目)	
	Δ XY	Δ Z	Δ XY	Δ Z
平均値	0.043	-0.059	0.020	-0.006
絶対値の最大値	0.053	0.052	0.036	0.050
RMS 誤差	0.014	0.007	0.014	0.031

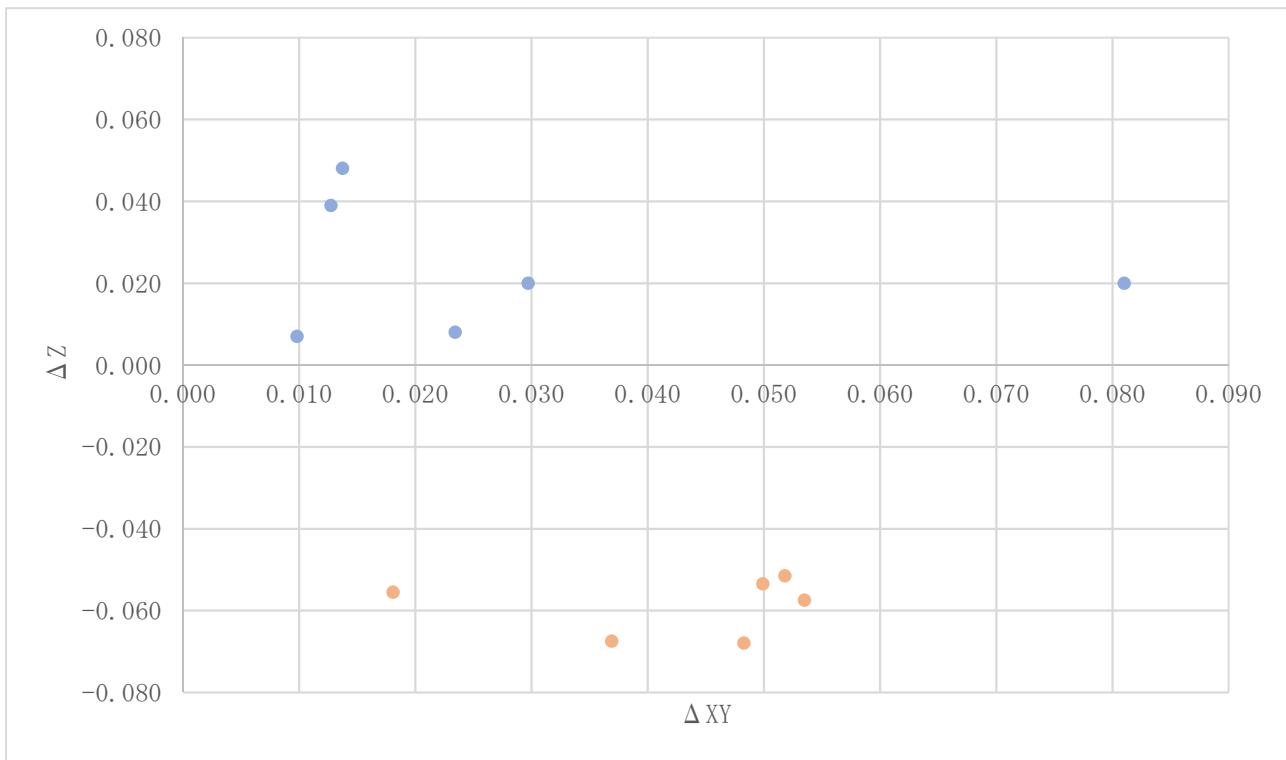


図- 3.2 MMS 計測の相対較差 (2 時期目-1 時期目).  
青色の円が 40 km/h, 橙色の円が 50 km/h で走行した際の相対較差を示す. 単位は m

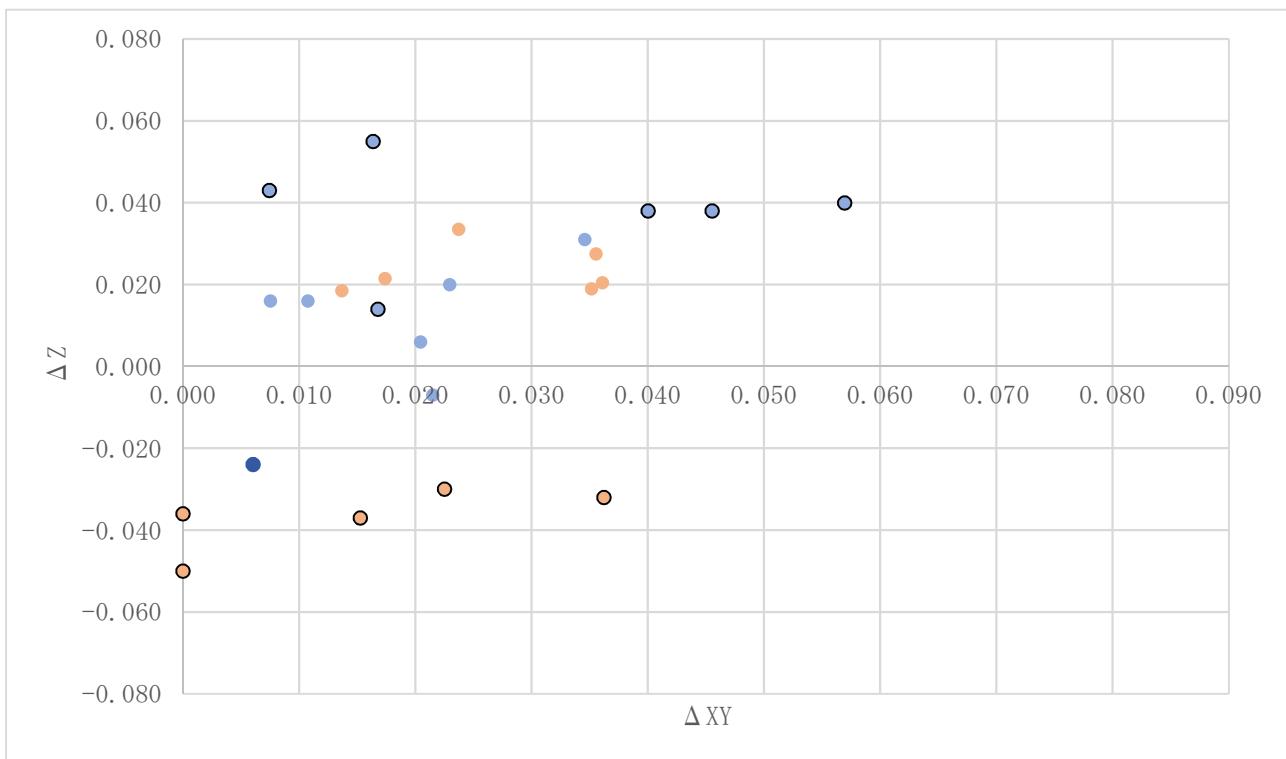


図- 3.3 MMS 計測の絶対誤差 (MMS 計測-TS 計測).  
青色の円が 40 km/h, 橙色の円が 50 km/h で走行した際の絶対較差を示す.  
枠線がない円は 1 時期目, 枠線がある円は 2 時期目の絶対較差である. 単位は m

## (2) 調整用基準点の有無による点群の精度検証

のり面上に設置した TG を 8 点, 地表面上に設置した C を 4 点用いて, MMS 計測で取得した点群の座標補正を行なった場合, 点群の精度がどのように変化するかを検証する. MMS 計測で点群を取得する条件は第 2 章の計測概要で述べた通りである. MMS が取得する点群はずれが生じているため, 調整用基準点を用いて補正を行なう必要がある. 調整用基準点の数量を変更して, 補正計算を行なった点群の精度を比較する. 調整用基準点である TG 2 はのり面の陰であることと上部にあり, 点群を十分に取得できていなかったため, 補正の計算には使用していない.

表-3.7, 表-3.8 に 1, 2 時期の KS の中心座標を示している. その表内の①から⑤の座標値はそれぞれのターゲットを用いて補正を行なった値である. ⑥の座標値は補正計算を行なう前の座標値である. これらの KS 座標値と TS 計測の KS 座標値を用いて表-3.9, 表-3.10 に 1, 2 時期の絶対較差をまとめている. 較差の絶対値の最大値である  $\pm 0.111$ ,  $\pm 0.071$  に近い値ほど濃く, セルを塗りつぶしている. 図-3.4 は表-3.9 をグラフにプロットした図, 図-3.5 は表-3.10 をグラフにプロットした図である.

まずは補正前の⑥の結果について述べる. MMS 計測で取得した点群は全体で一定方向にずれを生じていることが分かる. 1 時期目では Y 方向に +9 mm, Z 方向に +22 mm, 2 時期目では X 方向に -23 mm, Y 方向に +23 mm, Z 方向に -20 mm, 全体でずれが生じていることが分かる. これに対してターゲットを使用した補正を行なった結果, 全体にずれを生じさせる系統誤差がターゲットを使用した補正をしなくても同等の精度が得られることが示され, 図-3.4, 図-3.5 の絶対較差のプロットの様子より確認できる. 続いて, ターゲット (TG) を使用して補正を行なった (①～④) の結果について述べる. ターゲットを最も多く使用した①の RMS 誤差は, 26 mm 以内に収まっており, プロット図より補正が行なわれていることが確認できる. のり面周辺の地物 (C) を利用した補正方法(⑤)の結果について述べる. 本方法では 1 時期目の KS 3 と KS 4 のように 0.1 m を超える大きな較差を生むことがわかった. 対象とした 4 つの地物周辺では, のり面上のずれを補正するには至らないことが確認できた.

表- 3.7 各々の調整用基準点 (TG) を用いて補正を行なった中心座標 (1 時期目) 単位は m

1 時期目 KS 座標値									
	TG1-3-4-5-6-7-8 使用 (①)			TG1-4-5-7-8 使用 (②)			TG1-4-7-8 使用 (③)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
KS1	-75570.459	-81758.353	52.250	-75570.476	-81758.346	52.233	-75570.476	-81758.346	52.233
KS2	-75565.144	-81760.071	57.380	-75565.189	-81760.029	57.332	-75565.142	-81760.029	57.314
KS3	-75562.697	-81760.485	57.534	-75562.669	-81760.484	57.489	-75562.728	-81760.459	57.500
KS4	-75560.087	-81760.875	57.481	-75560.083	-81760.848	57.411	-75560.134	-81760.838	57.430
KS5	-75557.580	-81761.160	57.300	-75557.592	-81761.140	57.286	-75557.592	-81761.140	57.286
KS6	-75555.042	-81761.439	56.944	-75555.042	-81761.439	56.944	-75555.049	-81761.422	56.935
	TG1-7-8 使用 (④)			C1-2-3-4 使用 (⑤)			補正計算前 (⑥)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
KS1	-75570.459	-81758.353	52.250	-75570.344	-81758.384	52.198	-75570.430	-81758.336	52.231
KS2	-75565.141	-81760.029	57.310	-75565.090	-81760.071	57.329	-75565.159	-81760.034	57.380
KS3	-75562.660	-81760.504	57.493	-75562.571	-81760.525	57.484	-75562.663	-81760.460	57.507
KS4	-75560.134	-81760.838	57.422	-75559.986	-81760.888	57.405	-75560.069	-81760.844	57.439
KS5	-75557.612	-81761.159	57.334	-75557.496	-81761.179	57.278	-75557.614	-81761.145	57.353
KS6	-75555.062	-81761.405	56.907	-75554.967	-81761.444	56.908	-75555.034	-81761.419	56.959

表- 3.8 各々の調整用基準点 (TG) を用いて補正を行なった中心座標 (2 時期目). 単位は m

2 時期目 KS 座標値									
	TG1-3-4-5-6-7-8 使用 (①)			TG1-4-5-7-8 使用 (②)			TG1-4-7-8 使用 (③)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
KS1	-75570.440	-81758.349	52.254	-75570.440	-81758.349	52.254	-75570.470	-81758.337	52.223
KS2	-75565.137	-81760.042	57.333	-75565.193	-81760.020	57.327	-75565.193	-81760.020	57.327
KS3	-75562.674	-81760.489	57.514	-75562.674	-81760.489	57.514	-75562.693	-81760.447	57.489
KS4	-75560.078	-81760.875	57.465	-75560.163	-81760.837	57.436	-75560.077	-81760.838	57.401
KS5	-75557.591	-81761.179	57.354	-75557.586	-81761.132	57.296	-75557.586	-81761.132	57.296
KS6	-75555.021	-81761.424	56.915	-75555.021	-81761.424	56.915	-75555.067	-81761.399	56.925
	TG1-7-8 使用 (④)			C1-2-3-4 使用 (⑤)			補正計算前 (⑥)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
KS1	-75570.441	-81758.330	52.197	-75570.437	-81758.332	52.187	-75570.458	-81758.336	52.213
KS2	-75565.194	-81760.017	57.321	-75565.192	-81760.018	57.311	-75565.182	-81760.018	57.315
KS3	-75562.695	-81760.444	57.482	-75562.693	-81760.445	57.472	-75562.683	-81760.445	57.476
KS4	-75560.165	-81760.833	57.427	-75560.163	-81760.833	57.417	-75560.153	-81760.834	57.422
KS5	-75557.577	-81761.173	57.302	-75557.620	-81761.150	57.304	-75557.577	-81761.127	57.280
KS6	-75555.069	-81761.394	56.912	-75555.068	-81761.394	56.902	-75555.058	-81761.395	56.908

表- 3.9 補正後、MMS 計測の KS 座標値と TS 計測の座標値の絶対較差 (1 時期目) 単位は m

1 時期目 (MMS 計測-TS 計測) 絶対較差									
	TG1-3-4-5-6-7-8 使用 (①)			TG1-4-5-7-8 使用 (②)			TG1-4-7-8 使用 (③)		
	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
KS1	-0.041	-0.021	0.014	-0.058	-0.014	-0.003	-0.058	-0.014	-0.003
KS2	-0.001	-0.029	0.049	-0.046	0.013	0.005	0.001	0.013	-0.013
KS3	-0.015	-0.004	0.034	0.013	-0.003	-0.011	-0.046	0.022	0.000
KS4	0.005	-0.023	0.049	0.009	0.004	-0.018	-0.042	0.014	0.001
KS5	0.012	-0.001	-0.014	0.000	0.019	-0.028	0.000	0.019	-0.028
KS6	-0.003	-0.011	0.012	-0.003	-0.011	0.012	-0.010	0.006	0.003
平均値	-0.007	-0.015	0.025	-0.014	0.001	-0.007	-0.026	0.010	-0.007
最大値	0.041	0.029	0.049	0.058	0.019	0.028	0.058	0.022	0.028
RMS 誤差	0.019	0.011	0.026	0.030	0.013	0.015	0.026	0.013	0.012
	TG1-7-8 使用 (④)			C1-2-3-4 使用 (⑤)			補正計算前 (⑥)		
	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
KS1	-0.041	-0.021	0.014	0.074	-0.052	-0.038	-0.012	-0.004	-0.005
KS2	0.002	0.013	-0.017	0.053	-0.029	0.002	-0.016	0.008	0.049
KS3	0.022	-0.023	-0.007	0.111	-0.044	-0.016	0.019	0.021	0.007
KS4	-0.042	0.014	-0.007	0.106	-0.036	-0.024	0.023	0.008	0.010
KS5	-0.020	0.000	0.020	0.096	-0.020	-0.036	-0.022	0.014	0.039
KS6	-0.023	0.023	-0.025	0.072	-0.016	-0.024	0.005	0.009	0.027
平均値	-0.017	0.001	-0.004	0.085	-0.033	-0.023	0.000	0.009	0.022
最大値	0.042	0.023	0.025	0.111	0.052	0.038	0.023	0.021	0.049
RMS 誤差	0.025	0.019	0.017	0.023	0.014	0.015	0.019	0.008	0.021

較差の絶対値の最大値である  $\pm 0.111$  に近い値ほど色を濃く表示している。

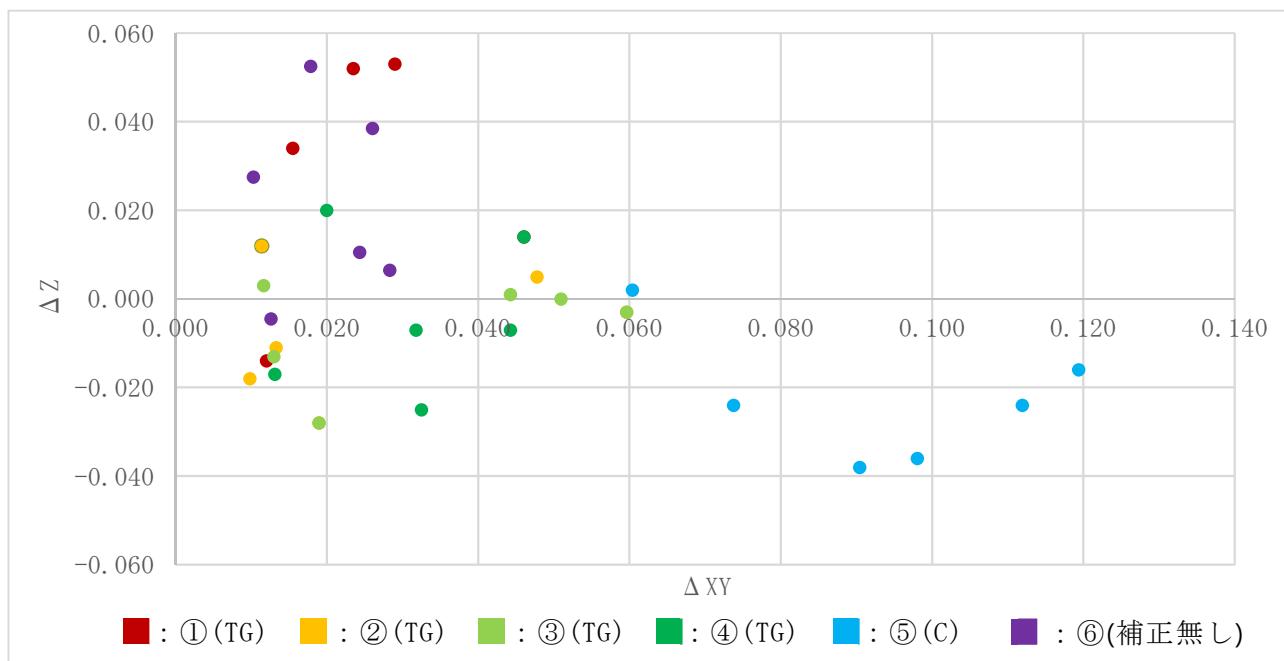


図- 3.4 表-3.9 の絶対較差をプロットした図. ①②③④⑤⑥は表- 3.9 に対応

表- 3.10 補正 MMS 計測の KS 座標値と TS 計測の KS 座標値の絶対較差 (2 時期目).

単位は  $m$  較差の絶対値の最大値である  $\pm 0.069$  に近い値ほど色を濃く表示している.

2 時期目 (MMS 計測-TS 計測) 絶対較差									
	TG1-3-4-5-6-7-8 使用 (①)			TG1-4-5-7-8 使用 (②)			TG1-4-7-8 使用 (③)		
	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
KS1	-0.021	-0.016	0.020	-0.021	-0.016	0.020	-0.051	-0.004	-0.011
KS2	0.007	0.001	0.008	-0.049	0.023	0.002	-0.049	0.023	0.002
KS3	0.010	-0.009	0.014	0.010	-0.009	0.014	-0.009	0.033	-0.011
KS4	0.016	-0.024	0.036	-0.069	0.014	0.007	0.017	0.013	-0.028
KS5	0.003	-0.021	0.039	0.008	0.026	-0.019	0.008	0.026	-0.019
KS6	0.019	0.004	-0.016	0.019	0.004	-0.016	-0.027	0.029	-0.006
平均値	0.006	-0.011	0.017	-0.017	0.007	0.001	-0.018	0.020	-0.012
最大値	0.021	0.024	0.039	0.069	0.026	0.020	0.051	0.033	0.028
RMS 誤差	0.014	0.012	0.020	0.036	0.017	0.016	0.029	0.014	0.010
	TG1-7-8 使用 (④)			C1-2-3-4 使用 (⑤)			補正計算前 (⑥)		
	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
KS1	-0.022	0.003	-0.037	-0.018	0.001	-0.047	-0.039	-0.003	-0.021
KS2	-0.050	0.026	-0.004	-0.048	0.025	-0.014	-0.038	0.025	-0.010
KS3	-0.011	0.036	-0.018	-0.009	0.035	-0.028	0.001	0.035	-0.024
KS4	-0.071	0.018	-0.002	-0.069	0.018	-0.012	-0.059	0.018	-0.007
KS5	0.017	-0.015	-0.013	-0.026	0.008	-0.011	0.017	0.031	-0.035
KS6	-0.029	0.034	-0.019	-0.028	0.034	-0.029	-0.018	0.033	-0.023
平均値	-0.028	0.017	-0.016	-0.033	0.020	-0.023	-0.023	0.023	-0.020
最大値	0.071	0.036	0.037	0.069	0.035	0.047	0.059	0.035	0.035
RMS 誤差	0.031	0.020	0.013	0.022	0.014	0.014	0.028	0.015	0.010

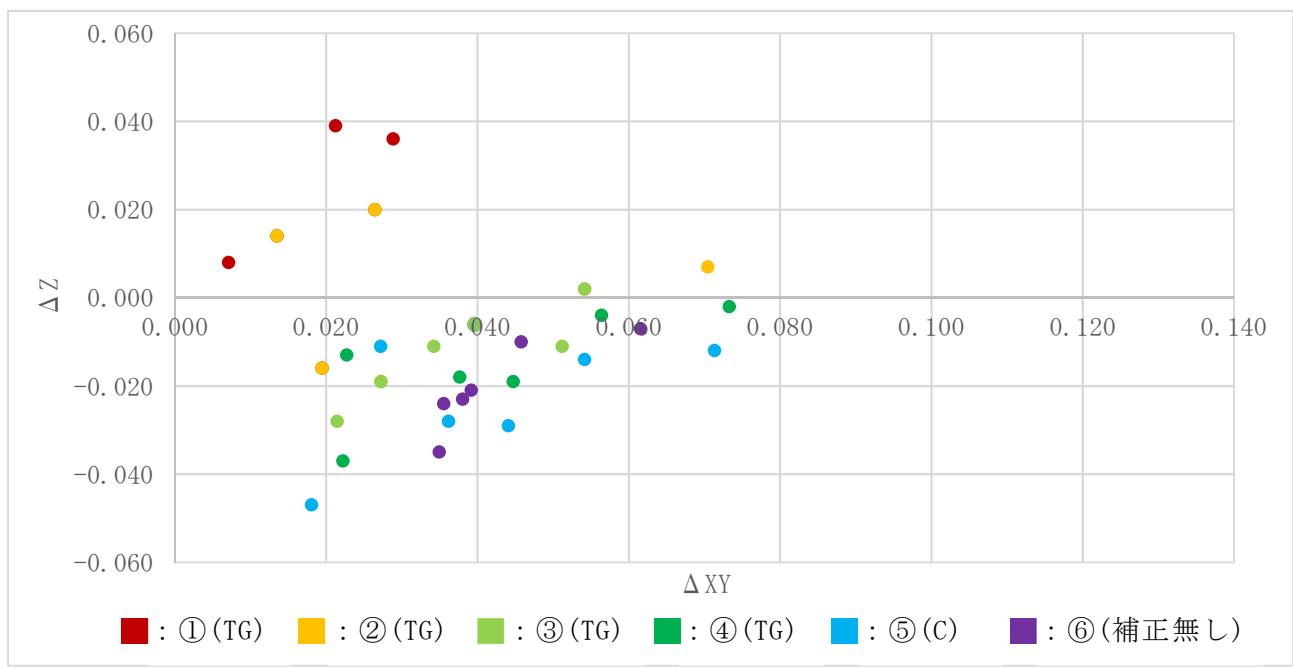


図- 3.5 表-3.10 の絶対較差をプロットした図. ①②③④⑤⑥は表- 3.10 に対応

### (3) 衛星配置による点群の精度検証

MMS 計測は GNSS アンテナで自己位置を測定しつつ点群を取得するため、その精度は GNSS 衛星の受信状況に左右されると考えられる。衛星状況が点群の精度に与える影響を検証する。

MMS 車両に搭載されている GNSS アンテナは GNSS 衛星から情報を受信して自己位置を計算している。GNSS 衛星は衛星の位置情報（軌道情報）と衛星が電波を発信した時刻の 2 つの情報を常に発している。衛星が電波を発信した時刻と受信機が電波を受信した時刻から電波が届くまでの時間を算出し、その値に電波の速度を掛けることで衛星から測量機までの距離を求めることができる。計算上では 3 つの衛星情報を受信することで自己位置である座標を算出することができるが、GNSS 衛星の内蔵時計にわずかな誤差があるため、その誤差による位置情報のずれを補正することが必要である。そのため 4 つの衛星情報を受信しなければならない。つまり衛星の配置状態が自己位置の精度に影響を与えることになる。自己位置が山やビルなどの陰になっている場合は受信できる衛星が減少してしまい、自己位置の精度が悪化してしまう。この衛星の配置状態を指標化したものを DOP (Dilution Of Precision : 精度低下率) という。衛星配置の良否を表した値を DOP 値といい、この値は測位精度との相関関係が高く、値が小さいほど測位精度が高い傾向を示す。この DOP のうち GNSS 衛星の位置精度に関わる PDOP (Position DOP : 位置精度低下率) を用いて、衛星配置の状態が良い時間帯と悪い時間帯で取得された点群を比較する。PDOP とは現在位置の誤差と衛星の位置の誤差の間の関係を表現する単位のない指標で衛星の配置が最も良い精度を得ることのできる時間帯を示す。この値が小さければ位置の精度が高く、大きければ位置の精度が低いことを示す<sup>13)</sup>。一般に PDOP が 3 以下となる時間帯が良い状態であるといわれる<sup>14)</sup>。

本検証で 5 月 28 日 (2 時期目) の 9:00～16:00 で受信することのできた衛星数を図-3.6 に示す。その衛星数から得られた PDOP を図-3.7 に示す。この際に使用した衛星は GPS (Global Positioning System) 衛星と GLONASS (Global Navigation Satellite) 衛星である。これらをまとめて GNSS 衛星と呼び、合計数として記している。結果として DOP の値が悪い時間は 5 月 28 日の 9:30 から 9:32, 13:08 から 13:15 である。PDOP 値が悪い (高い) 点群と PDOP 値が良い (低い) 点群の精度を比較する。それぞれのデータは表-3.11 のように取得されたものである。

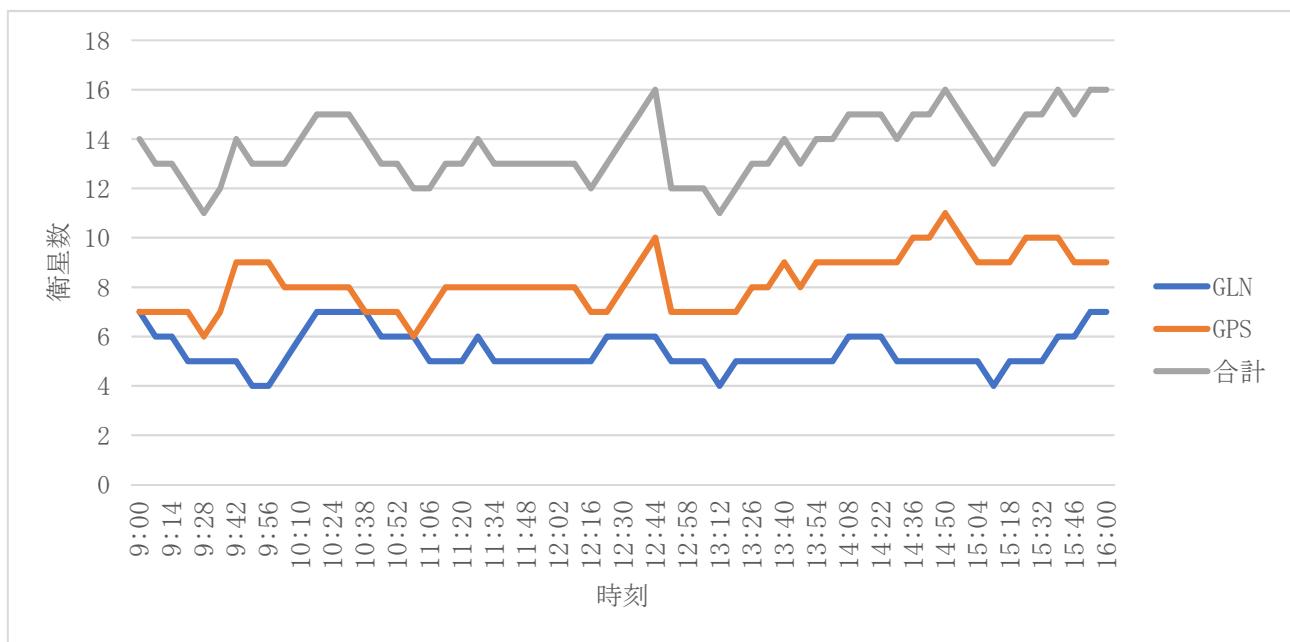


図- 3.6 5月28日 9:00~16:00 の GPS, GLONASS 衛星数

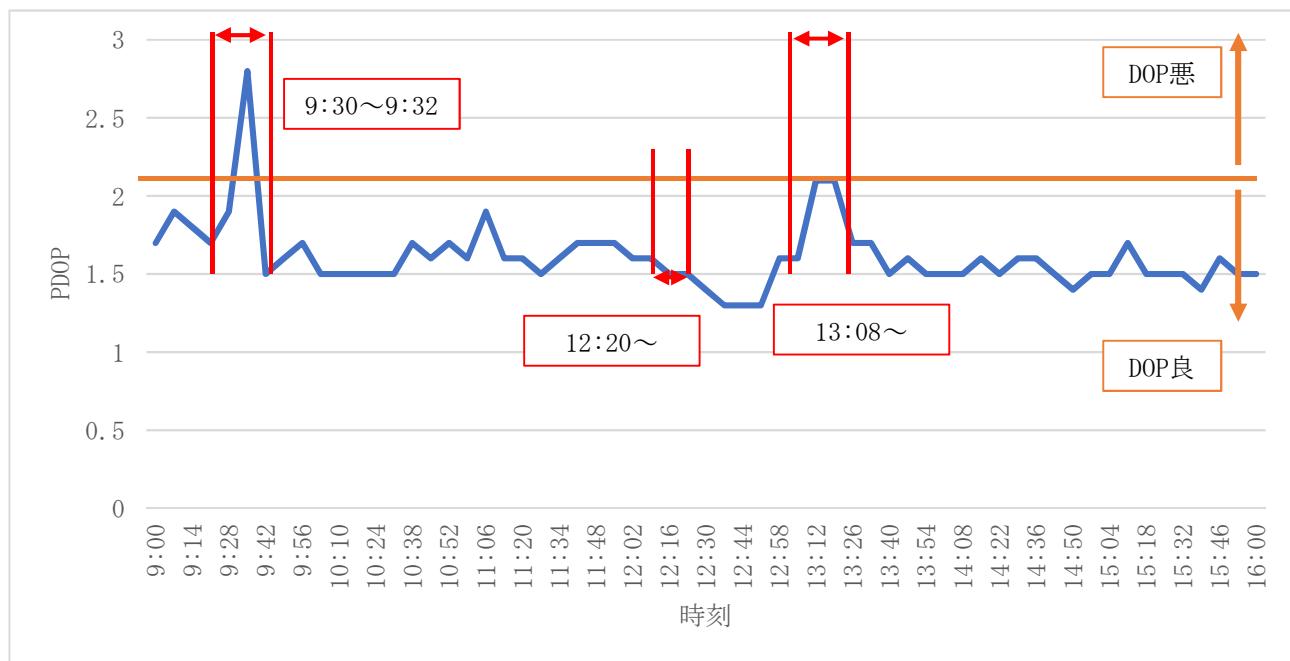


図- 3.7 5月28日 9:00~16:00 の PDOP 値

表- 3.11 比較検証を行なう 2 つの点群データの条件

		PDOP 悪	PDOP 良
点群取得時期		5 月 28 日 (2 時期目)	5 月 28 日 (2 時期目)
計測	開始時刻	9:30	12:20
	終了時刻	9:32	12:22
点群取得速度		50 km/h	50 km/h
車線		車線② (追い越し車線)	車線② (追い越し車線)

DOP 良否によって分け, MMS 計測結果から TS 計測結果を引いた絶対較差が表-3.12, 表-3.13 である. これらの表をまとめたものが, 表-3.14 であり, 較差をプロットしたものが図-3.8 である. MMS 計測結果は補正を行なっていないオリジナルデータを使用している.

これらより DOP 条件が悪いときには誤差が  $\Delta XY$  方向で 0.032 m,  $\Delta Z$  方向で 0.021 m, そして DOP 条件が良いときには誤差が  $\Delta XY$  方向で 0.023 m,  $\Delta Z$  方向で 0.010 m であったことがわかる. 以上より DOP の良否によって MMS 計測による誤差が  $\Delta XY$  で 0.009 m,  $\Delta Z$  で 0.011 m の差があることが確認できた.

表- 3.12 DOP 悪の MMS 計測結果と TS 計測結果の絶対較差 (単位は m)

	MMS 計測 (DOP 悪)			TS 計測			絶対較差 (MMS-TS)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
KS1		-81758.327	52.166	-75570.419	-81758.333	52.234	-0.029	0.007	-0.068
KS2	-75565.208	-81760.009	57.287	-75565.144	-81760.043	57.325	-0.064	0.034	-0.038
KS3	-75562.677	-81760.450	57.435	-75562.684	-81760.480	57.500	0.007	0.030	-0.065
KS4	-75560.127	-81760.814	57.369	-75560.094	-81760.851	57.429	-0.033	0.037	-0.060
KS5	-75557.622	-81761.134	57.272	-75557.594	-81761.158	57.315	-0.028	0.024	-0.043
KS6	-75555.116	-81761.412	56.919	-75555.040	-81761.428	56.931	-0.076	0.016	-0.012

表- 3.13 DOP 良の MMS 計測結果と TS 計測結果の絶対較差 (単位は m)

	MMS 計測 (DOP 良)			TS 計測			絶対較差 (MMS-TS)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
KS1	-75570.452	-81758.371	52.177	-75570.419	-81758.333	52.234	-0.033	-0.038	-0.057
KS2	-75565.146	-81760.062	57.293	-75565.144	-81760.043	57.325	-0.002	-0.019	-0.032
KS3	-75562.690	-81760.481	57.463	-75562.684	-81760.480	57.500	-0.006	-0.001	-0.037
KS4	-75560.078	-81760.884	57.399	-75560.094	-81760.851	57.429	0.016	-0.033	-0.030
KS5	-75557.574	-81761.188	57.277	-75557.594	-81761.158	57.315	0.020	-0.030	-0.038
KS6	-75555.040	-81761.451	56.895	-75555.040	-81761.428	56.931	0.000	-0.023	-0.036

表- 3.14 表- 3.12 と表- 3.13 のまとめ (単位は m)

	絶対較差 (MMS-TS) (DOP 悪)			絶対較差 (MMS-TS) (DOP 良)		
	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
平均値	0.037	-0.024	0.048	0.001	0.024	0.038
最大値	0.076	0.037	0.068	0.033	0.038	0.057
RMS 誤差	0.029	0.012	0.021	0.028	0.013	0.010
	0.032	0.021			0.023	0.010

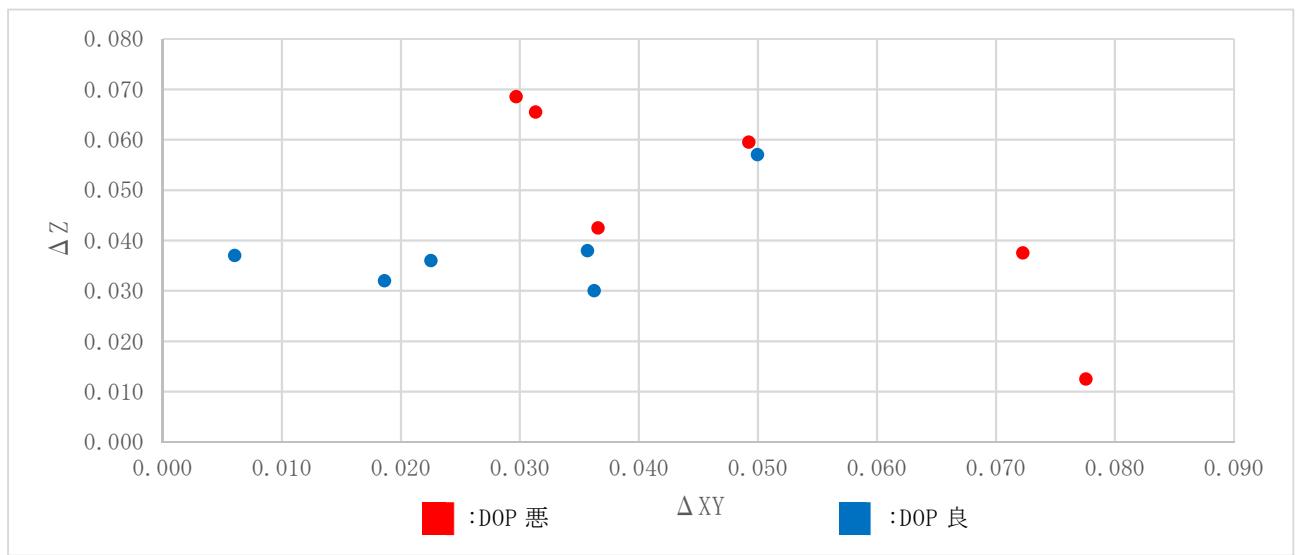


図- 3.8 DOP がそれぞれの条件で MMS 計測した座標と TS 計測座標値の較差 (単位は m)

### 3.2 MMS計測で取得した点群密度の検証

本項では MMS 計測で取得する点群の密度を確認する。本研究で使用したレーザスキヤナは 1 秒間に 100 万点スキャンできる機器である。この機器を MMS 車両に搭載して、時速 40 km/h, 50 km/h で走行し、取得した点群密度を確認する。また点群密度にはのり面上に設置した TG, KS のターゲットを使用する。このターゲット上に存在する点群数をターゲットの面積 ( $0.49 \text{ m}^2$ ) で割ることで点群密度 (点/ $\text{m}^2$ ) を求める。表-3.15, 図-3.9 にその結果をまとめると。

表- 3.15 MMS 計測で取得したターゲット上の点群密度 (点/ $\text{m}^2$ )  
赤色のセルはのり面下部、青色のセルはのり面上部に設置されたターゲット

	点群密度 (点/ $\text{m}^2$ )			
	MMS 40 km/h		MMS 50 km/h	
	1 時期目	2 時期目	1 時期目	2 時期目
TG1	1065	1016	839	827
TG3	1094	982	1010	837
TG4	584	602	496	488
TG5	967	957	869	796
TG6	543	639	512	518
TG7	906	900	600	761
TG8	604	500	549	465
KS1	655	610	455	529
KS2	582	561	473	445
KS3	631	586	502	510
KS4	610	620	480	516
KS5	588	520	441	433
KS6	629	573	484	457

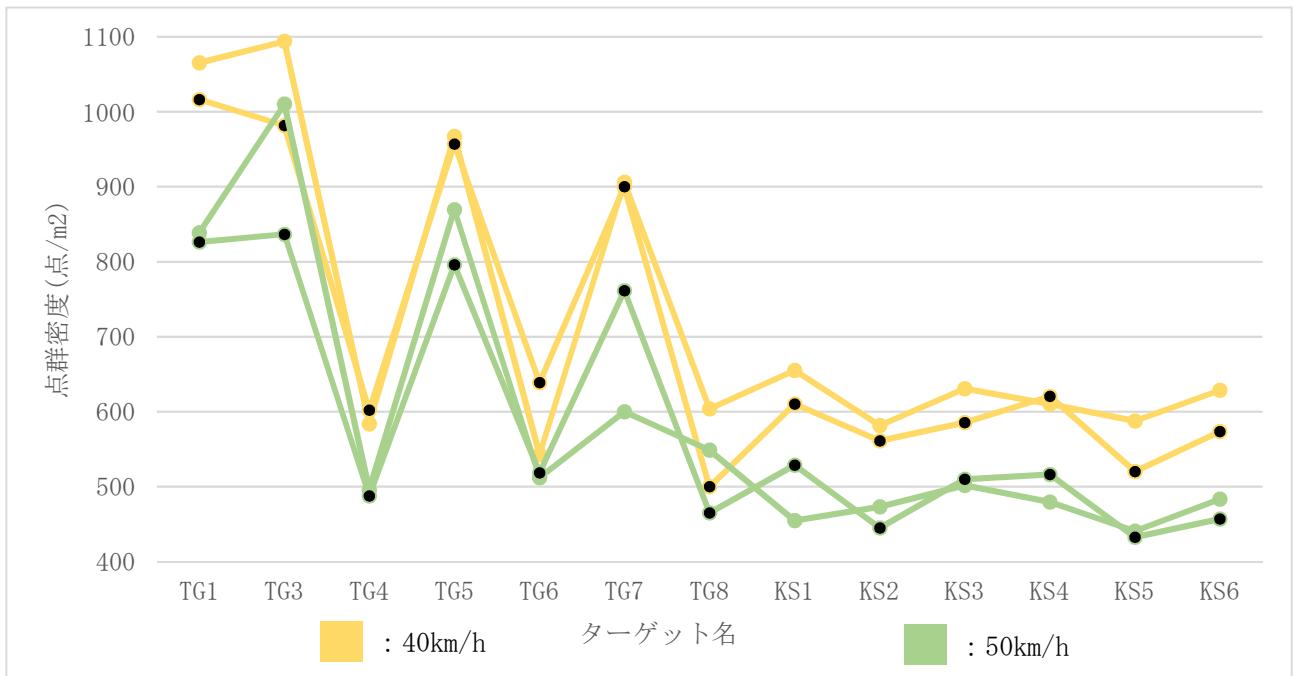


図- 3.9 MMS 車両の速度変化による取得点群数の変化

MMS 車両の走行速度の変化による点群取得数の減少を表すため, 以下の(7)の式を用いる.

$$\text{Rate of decrease (\%)} = (1 - \frac{\text{Points}(50\text{ km/h})}{\text{Points}(40\text{ km/h})}) \times 100 \quad (7)$$

この点群減少率の式は MMS 車両の走行速度を変化させた際にどれだけ点群取得数が変化するかを数値化したものである. Points(50 km/h) は MMS 車両が 50 km/h で走行した際に取得したターゲット上の点群の数である. 同様に Points(40 km/h) は MMS 車両が 40 km/h で走行した際に取得したターゲット上の点群数である.

表-3.16 より, この点群減少率を用いると, MMS 車両が 40 km/h で走行した際の点群は 50 km/h で走行した際の点群の数に比べて減少したことが分かる. さらにのり面の点群は約 20 % 減少したことが分かる. 点群数は多ければ, 地物を精密に表すことができるため, MMS 車両が遅く走行するほど, 対象物のひび割れなどの変化を詳細に表すことができると考えられる.

以上より, MMS の走行速度によって, 得られるレーザ点群の精度に大きな影響を及ぼすことは確認できなかったが, 点群数には影響を与えることが確認できた.

表- 3.16 MMS 車両の走行速度の変化による 1, 2 時期の点群減少 (%)

	1 時期目の点群減少率 (%)	2 時期目の点群減少率 (%)
TG1	21.3	18.7
TG3	7.6	14.8
TG4	15.0	19.0
TG5	10.1	16.8
TG6	5.6	18.8
TG7	33.8	15.4
TG8	9.1	6.9
KS1	30.5	13.4
KS2	18.6	20.7
KS3	20.4	12.9
KS4	21.4	16.8
KS5	25.0	16.9
KS6	23.1	20.3
平均値 (下部)	18.2	16.4
平均値 (上部)	17.3	16.5

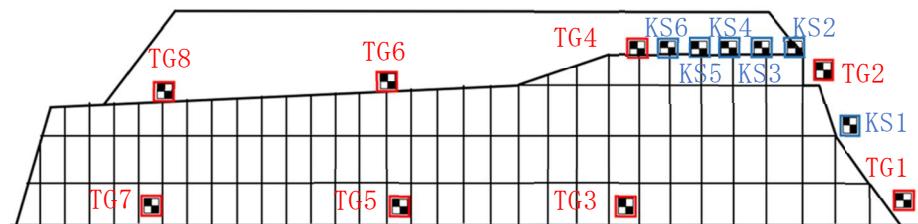


図- 3.10 のり面上に設置したターゲット一覧  
調整用基準点 (TG) は 8 点, 検証点 (KS) は 6 点

### 3.3 MMS計測で取得した点群の変状再現精度の検証

本節では、MMS 計測で取得した点群が変状をどれだけ再現できるかを検証する。計測精度確認のため、クラックとはらみ出しを模した模擬供試体を TG 8 付近の上段に、TG 7 付近の下段に 2 つ設置した（図-3.11）。それぞれの供試体には、クラックを模した変状として横型亀裂、縦型亀裂の 2 種類とはらみ出しを模した変状として、厚みの異なる板を 6 つ設置した。クラックを模した変状は 5, 10, 20, 30, 50, 100 mm の隙間を空けて供試体を設置している（図-3.12）。この供試体の一つの区切りは横 0.5 m、縦 50 mm、奥行き 50 mm である。この隙間を点群で再現できるかを確認する。はらみ出しを模した変状は 2, 5, 10, 20, 30, 50 mm の厚みのある板を設置し、この厚さを点群で再現できるかを確認する。

また、これらの供試体の点群を 2 種類の方法で取得する。1 つ目の方法は MMS 車両の速度を 40 km/h で、2 つ目は 50 km/h で走行して点群を取得する。これらの方で取得した上下に設置した供試体の点群の再現性を確認する。点群の表示には図-3.13 のように 0.2 m の断面で行なう。

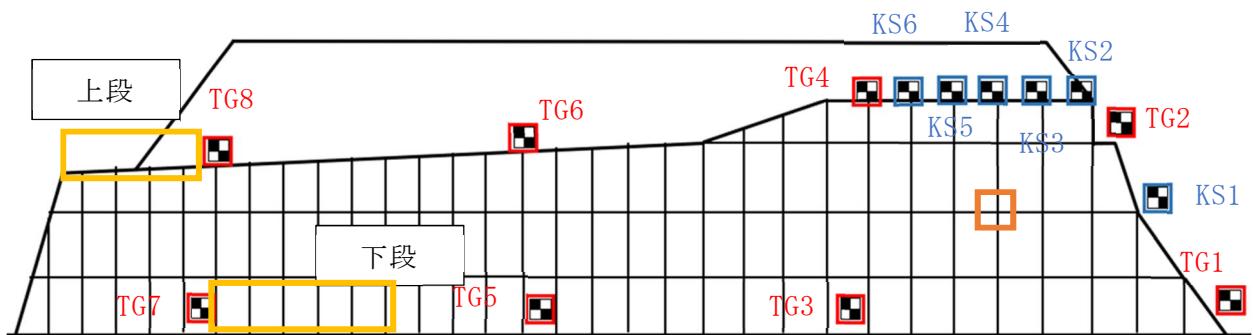


図- 3.11 のり面上段、下段に設置した供試体（黄枠）の位置

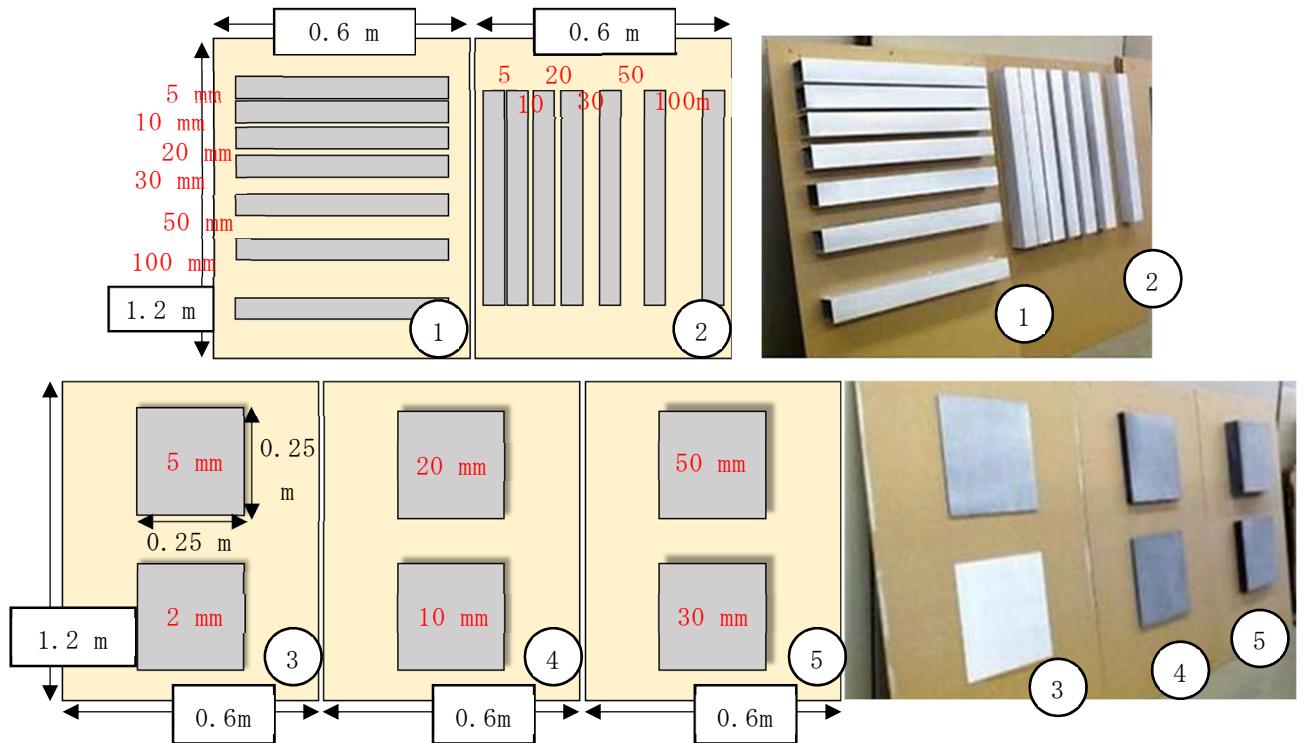


図- 3.12 のり面上に設置した供試体の図解と写真  
 ①, ②はひび割れを模した変状, ③, ④, ⑤ははらみ出しを模した変状

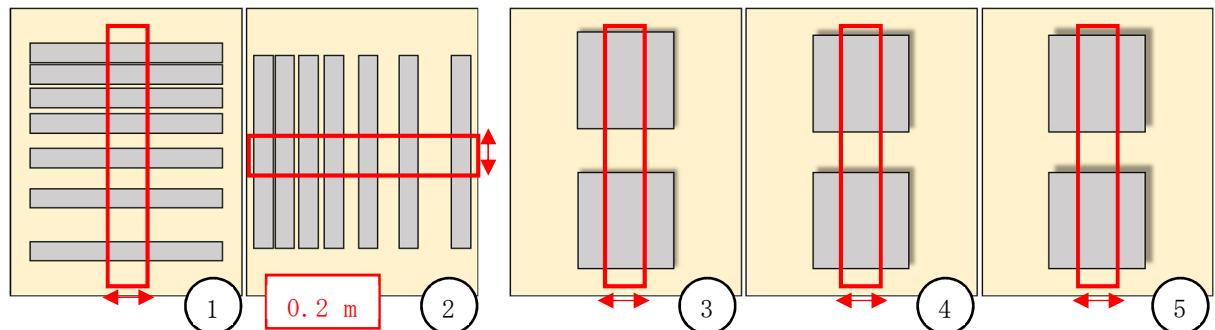


図- 3.13 のり面上に設置した供試体の点群を断面でカットした図  
 それぞれの供試体点群を 0.2m ずつで断面をカットする

まずは MMS 車両が時速 40 km で走行した際の供試体の点群を評価する。のり面下部の点群は図-3.14, 上部の点群は図-3.15 の通りである。

のり面下部で取得した点群について述べる。のり面表面が地面と垂直ではなく、緩やかに傾斜していることとそこに供試体を立てかけたことで、点群は実際には斜めに取得されているが、図では地面と垂直方向に表示している。まずはクラックを模した供試体①, ②について述べる。横方向のクラックを模した①は斜めに立てかけたことによりクラック後方の点群を垂直に取得できておらず、緩やかにクラックを確認することができる。またクラックを確認できるのは 20 mm 程度の隙間であり、この 20 mm の隙間の時点では 50 mm の深さがあるはずのクラックも 3 分の 1 程度の深さしか確認できない。縦方向のクラックを模した②の供試体は 5 mm のクラックまで確認できる

が、50 mm の深さを検出することはできていない。続いて、はらみ出しを模した供試体の③、④、⑤について述べる。こちらも供試体①、②同様にのり面上に斜めに立てかけている。この供試体の点群の様子は 10 mm の際にはっきりと検出することができる。供試体付近に設置していた TG 7 には 470 点の点群が存在していた。

続いてのり面上部で取得した点群について述べる。上部の供試体は保護網上に設置したため、供試体は地面と垂直となっている。まずはクラックを模した供試体①、②について述べる。横方向のクラックを模した①は下部の点群と同様に 20 mm のクラックまで検出することができる。下部の供試体とは異なり、上部の供試体は MMS 車両間で距離・角度があるため、四角形で表示される点群が丸く表示されている。縦方向のクラックを模した供試体②は、下部では 5 mm が検出できたことに対して 20 mm までしか検出できない。はらみ出しを模した③、④、⑤では 10 mm の供試体は検出できることがわかった。供試体付近の TG 8 は 320 点の点群が存在していた。

続いて MMS 車両が時速 50 km で走行した際の供試体のレーザ点群を評価する。のり面下部の点群は図-3.16、上部の点群は図-3.17 の通りである。

のり面下部で取得した点群について述べる。クラックを模した供試体の①、②について述べる。横方向のクラックを模した①の供試体では 20 mm、縦方向のクラックを模した②の供試体では 5 mm の変状を識別することができた。この結果は時速 40 km で走行した際の結果と同じである。続いてはらみ出しを模した変状の③、④、⑤について述べる。2 mm の供試体の下部にはわずかに供試体の角の点群を確認することができるため、検出できる可能性があるが、10 mm のはらみ出しであれば検出できることが分かった。供試体付近に設置していた TG 7 には 385 点の点群が存在していた。

続いてのり面上部で取得した点群について述べる。横方向のクラックを模した供試体①では 20 mm のクラックを検出できた。しかし、断面で見た際にクラックの形状を点群で十分に再現できていない。縦方向のクラックを模した供試体②では、時速 40 km で走行した際と同様に 20 mm のクラックを確認することができた。供試体③、④、⑤について述べる。はらみ出しを模した供試体は 10 mm で検出できることが分かった。供試体付近の TG 8 の点群は合計 292 点であった。

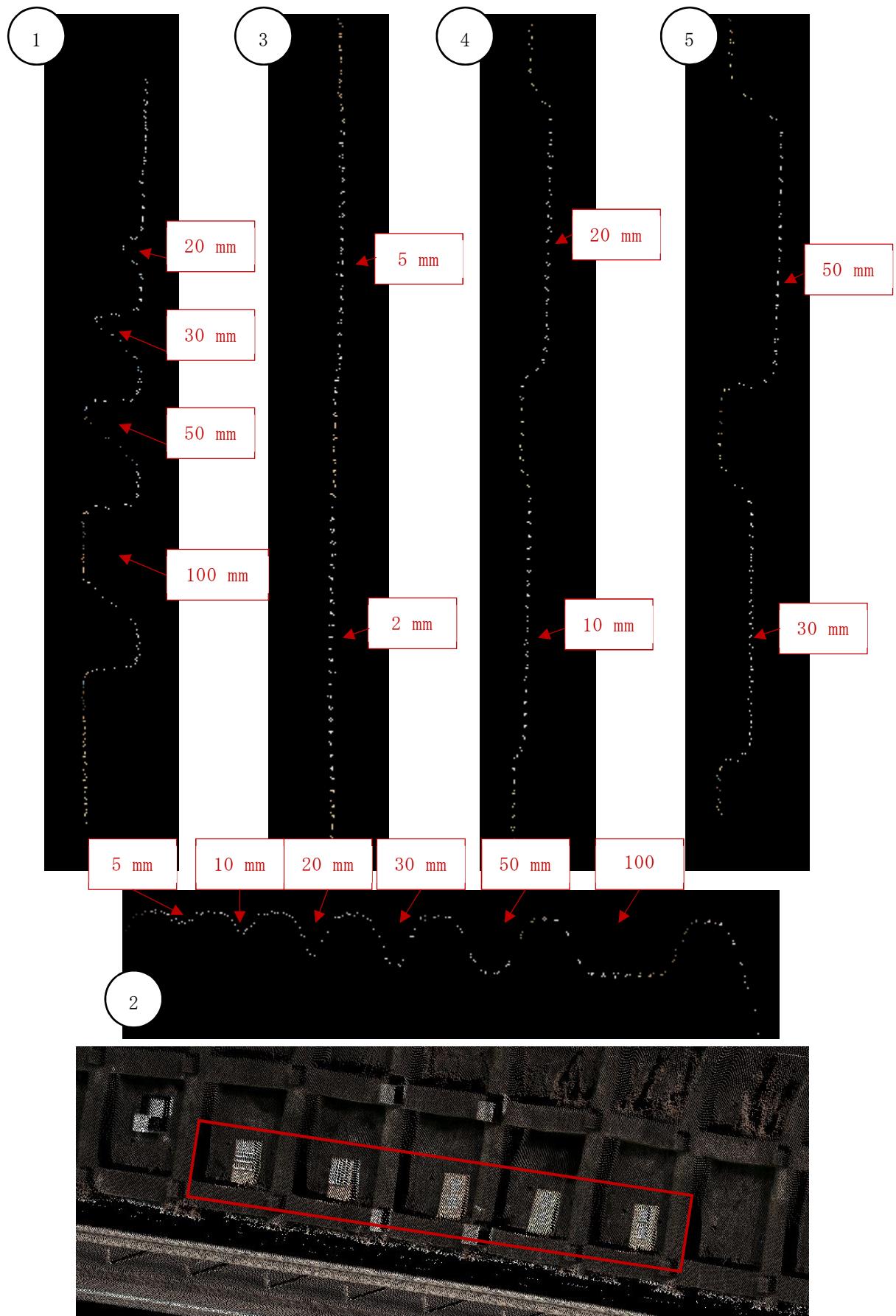


図- 3.14 MMS 車両が 40 km/h で走行した際に取得した下段の供試体の点群

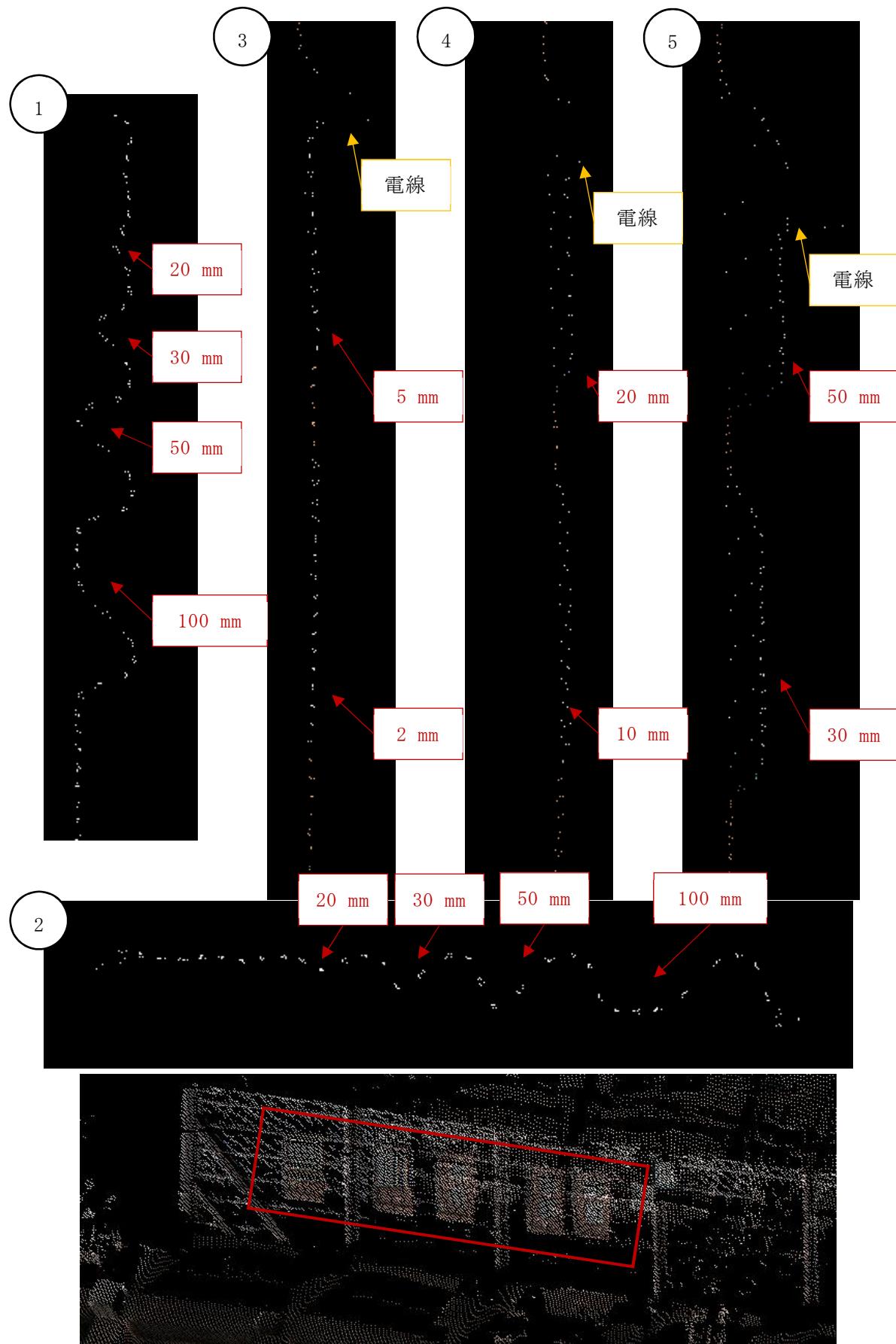


図- 3.15 MMS 車両が 40 km/h で走行した際に取得した上段の供試体の点群

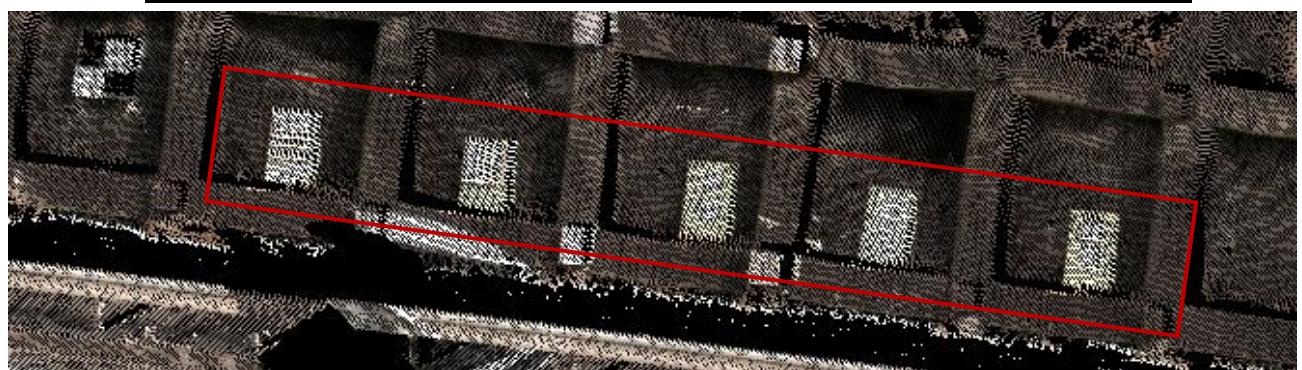
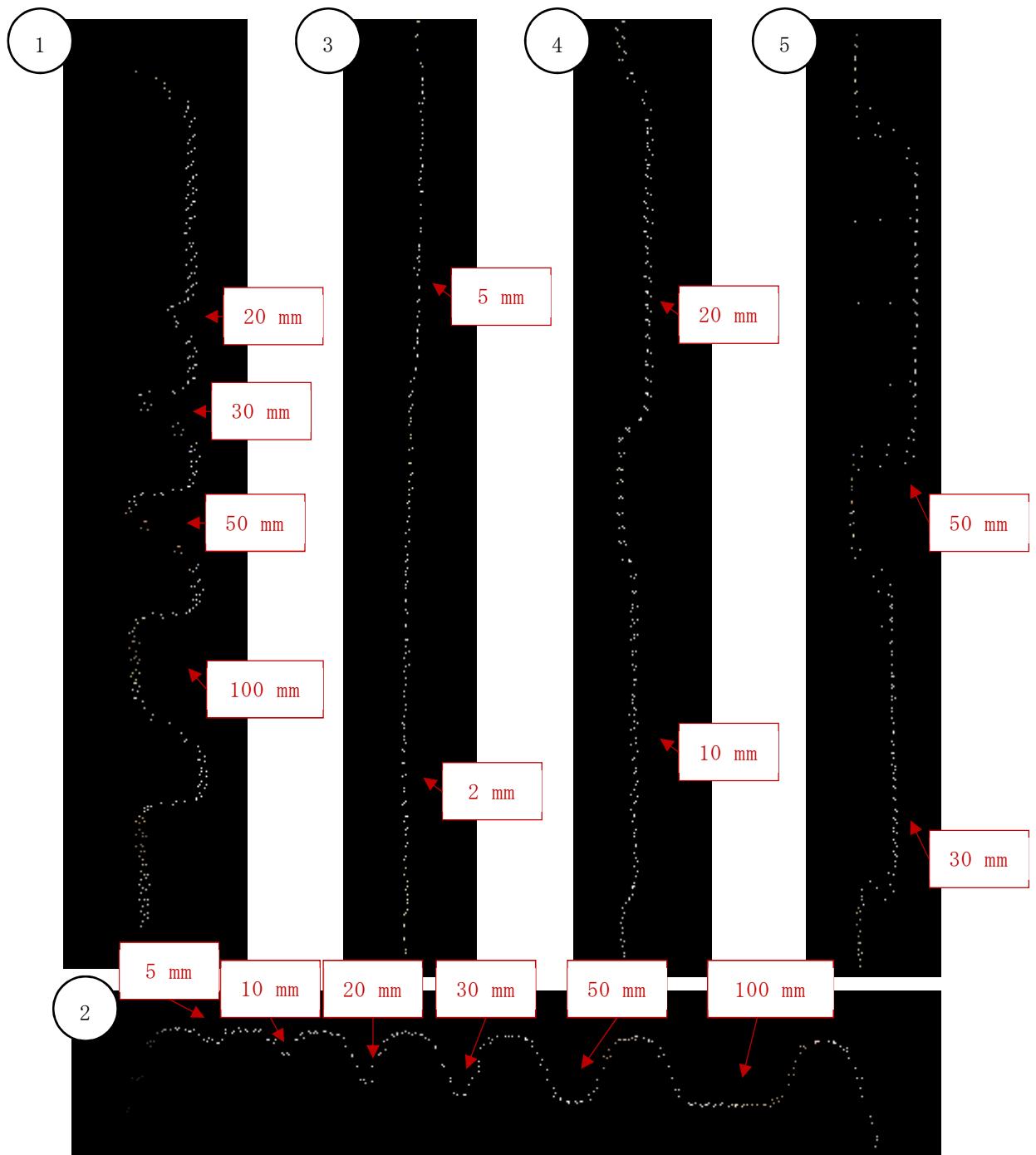


図- 3.16 MMS 車両が 50 km/h で走行した際に取得した下段の供試体の点群

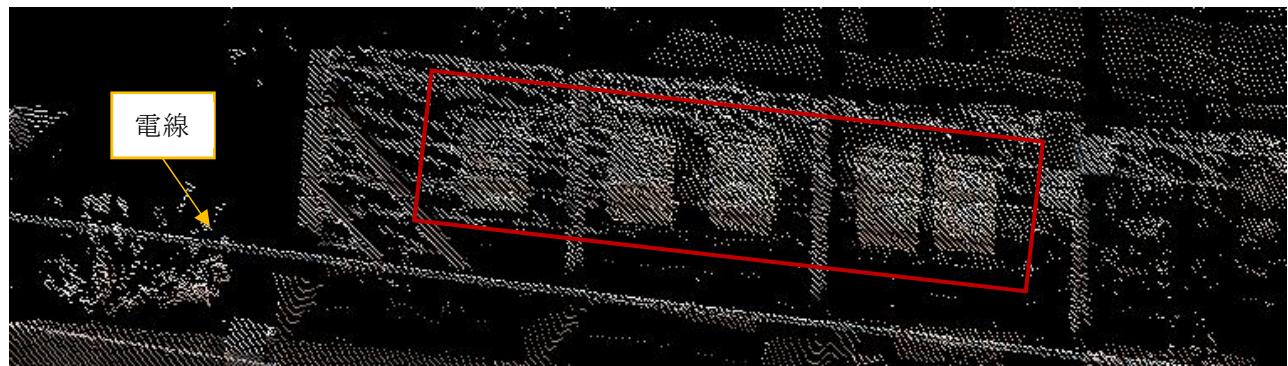
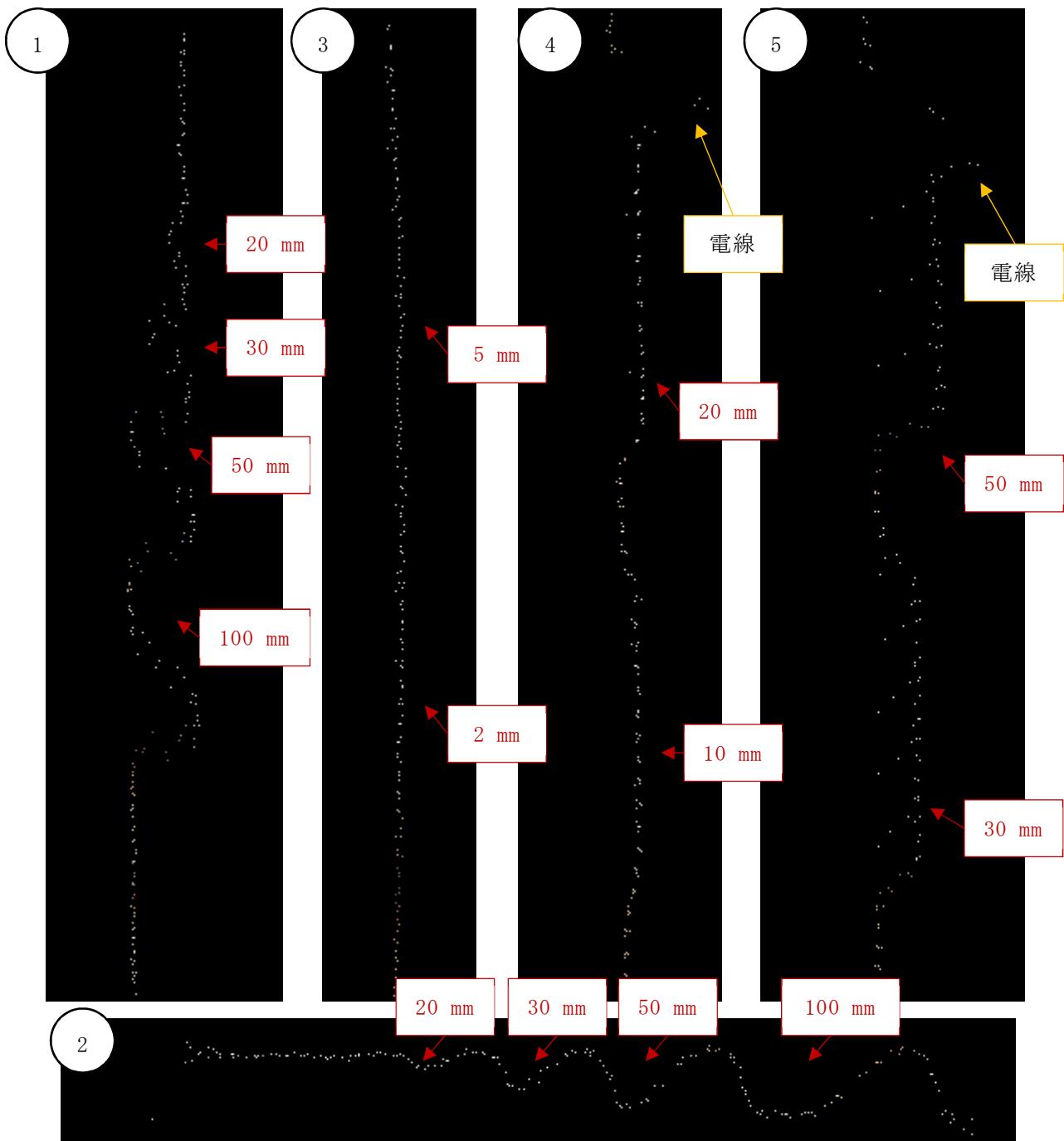


図- 3.17 MMS 車両が 50 km/h で走行した際に取得した上段の供試体の点群

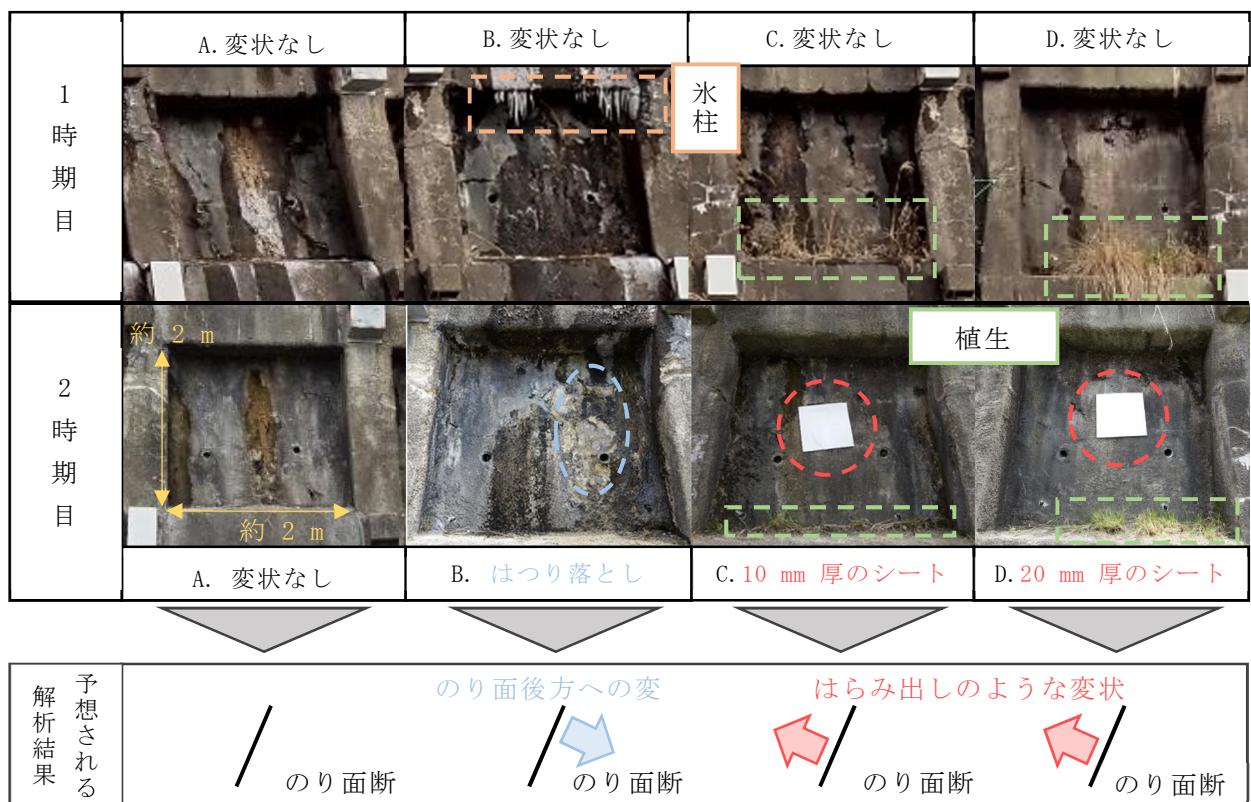
## 第4章 Iterative Closest Point に関する検証

本章では、ICP アルゴリズムに関する 2 つの検証を行なう。1 つ目は模擬変状を用いてのり面変状の抽出を行なう。2 つ目はそれらの点群の点数を減らすサンプリングを行ない、点群密度の増減によって変状抽出の精度に変化が生じるかを検証する。

### 4.1 のり面変状抽出の検証

本節では、MMS 計測によって得られた点群を用いて ICP 手法がどのような変状を抽出できるかを検証した。本検証では、対象のり面のり枠 4 つ分を使用し、1 時期目にはそのままのり面を MMS 計測にて取得し、2 時期目には模擬変状を与える、ICP 手法により検出できるかを検証する。

のり枠内に設置した模擬変状について説明する(図-4.1)。これらの模擬変状を用いて、得られると予想される結果を下部に示す。まずのり枠 A は、1 時期目と 2 時期目ともに模擬変状を設置せず、解析の結果、変状が検出されないことを確認する。のり枠 B には、1 時期目には模擬変状を設置せず、2 時期目にはのり面表面のコンクリートを削り、最大 40 mm 程度のはつり落としを行なった。はつり落としの全長は約 1 m でのり枠の中央右付近で、はつり落としを行なった。のり枠 C, D では、1 時期目に模擬変状を設置せず、2 時期目にはそれぞれ 10 mm, 20 mm のシートを設置した。これらのシートは 1 辺 0.5 m である。ICP 手法がどの程度の変状を検出できるかを検証する。また図-4.1 の通り、のり面上には氷柱や植生などの点群(ノイズ)が存在している。そこで検証を行なう際にこの点群を除去するフィルタリングを行ない、解析を行なう。フィルタリングを行なう前の検証結果、行なった後の検証結果を以下に述べる。



#### 図- 4.1 変状の供試体を設置したのり枠とそれぞれののり枠で期待される変状

フィルタリングを行なう前の模擬変状の抽出精度を確認する。1, 2 時期目の点群は MMS 車両が時速 50 km で追い越し車線である車線②（図-2.16）を走行し、本検証では PDOP が相対的に良いとされる 2.0 以下の際に取得したものである。またこれらの点群は調整用基準点を用いて位置補正を行なったものである。フィルタリング前ののり枠の解析結果を図-4.2, 図-4.3, 図-4.4, 図-4.5 に示す。それぞれの図において、上部のベクトル図はベクトルと変化量を示して変化の方向と大きさを表し、下部のヒートマップ図は色によって変化を表している。また下部のヒートマップで表した図は、その図の右に示した Displacement value (m) によって変化の大きさを表している。単位は m である。また図-4.6, 図-4.7, 図-4.8, 図-4.9 はそれぞれののり枠で模擬変状を設置した付近で 0.4 m 程度点群を区切り、のり枠断面として変状を抽出したものである。

まずのり枠 A の解析結果について述べる。のり枠内全体に変化が表れているが、特定の方向に大きな変化を検出することはできない。のり枠の上下の一部でノイズと思われる大きな変化が見られる。続いて、のり枠 B の解析結果について述べる。約 40 mm のはつり落としを行なった。氷柱の点群、もしくはのり枠のノイズによる影響か、解析結果の上部にはのり面の地山側に変位する様子が確認でき、その影響かはつり落としの変化は確認することができない。しかし、図-4.7 ののり枠断面の解析結果では、はつり落としによる変状を確認することができる。最後にのり枠 C, D の解析結果について述べる。それぞれののり枠に 10 mm, 20 mm のはらみ出しを模したシートを設置している。どちらとも上部のベクトル図や断面の解析結果から変化の様子を確認できる。また、本解析結果はのり枠下部の植生の影響が大きい。

フィルタリングを行なった後の模擬変状の抽出精度を確認する。点群からそれぞれの時期で不要となる箇所を削除して、解析を行なった。解析を行なったのは、のり枠で区切られたのり面表面の 4 区分を植生や氷柱、のり枠などの点群を取り除いたもの 4 つを対象に解析を行なう。

フィルタリング後の解析結果は図-4.10, 図-4.11, 図-4.12, 図-4.13 の通りである。これらはフィルタリング前の解析結果と同様に、上部にベクトル図、下部にヒートマップ図を配置している。模擬変状箇所の 0.4 m 程度を切り抜き、断面で解析をした結果が図-4.14, 図-4.15, 図-4.16, 図-4.17 である。

まずのり枠 A の解析結果について述べる。のり枠の上下に存在する点群やノイズなどを除去することで、のり面上に存在する小さな変化のみが結果に存在している。続いてのり枠 B の解析結果について述べる。上部に存在する点群を除去することではつり落としの変化の様子を明瞭に確認することができる。断面においてもはつり落としの様子のみを確認できる。最後にのり枠 C, D の解析結果について述べる。のり枠下部の植生の影響が大きく、これらの点群を除去することで 1 時期目と 2 時期目の点群が合致せず、一部で変状として表れている。しかし、設置したシートはフィルタリング前と比較して明瞭に確認することができるようになった。

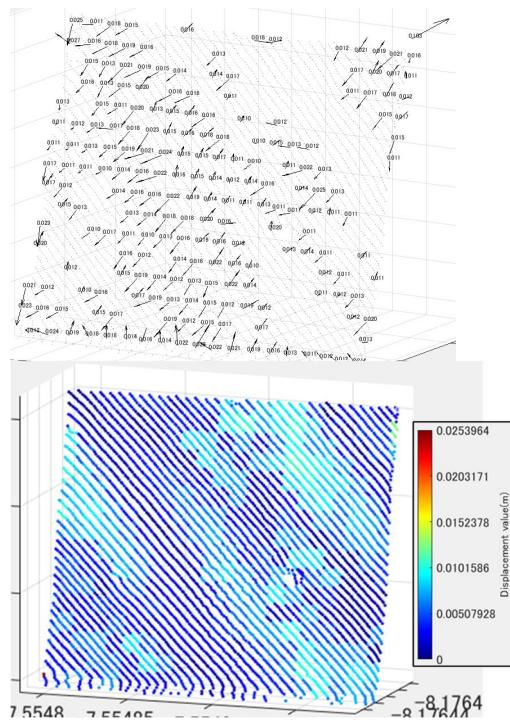


図-4.2 フィルタリング前の  
のり枠 A の解析結果

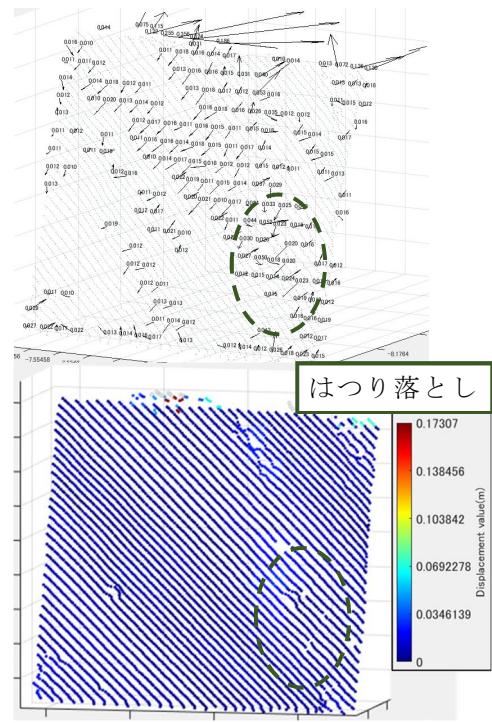


図-4.3 フィルタリング前の  
のり枠 B の解析結果

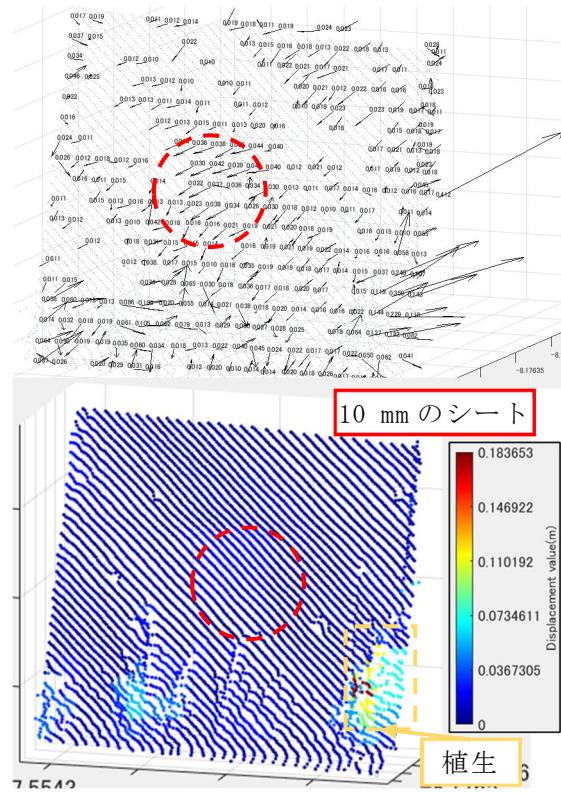


図-4.4 フィルタリング前の  
のり枠 C の解析結果

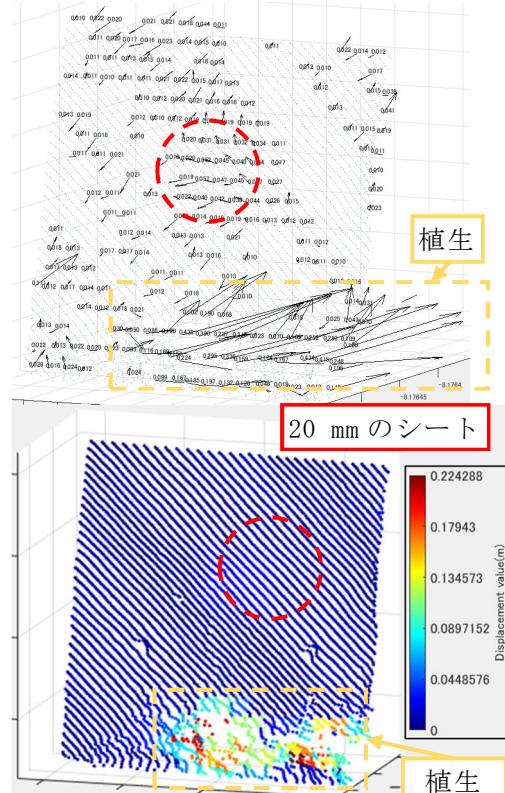


図-4.5 フィルタリング前の  
のり枠 D の解析結果

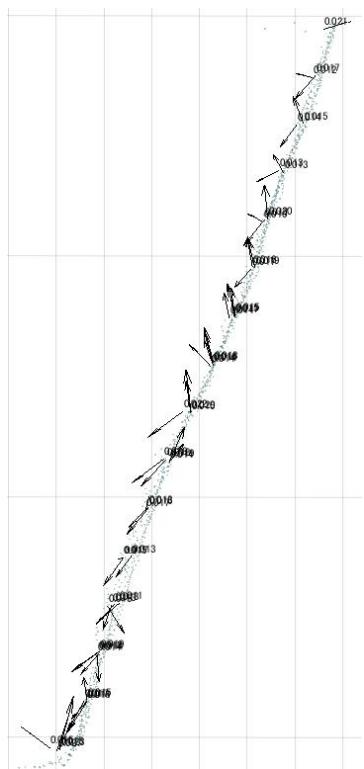


図- 4.6 フィルタリング  
前ののり枠 A 断面 (0.4m)  
の解析結果

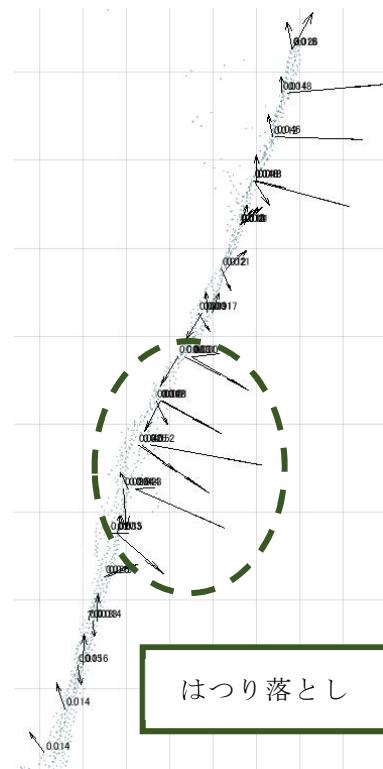


図- 4.7 フィルタリング  
前ののり枠 B 断面 (0.4m)  
の解析結果

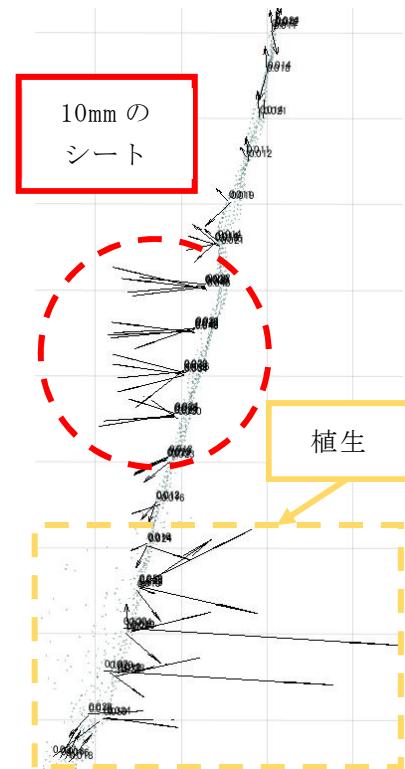


図- 4.8 フィルタリング  
前ののり枠 C 断面 (0.4m)  
の解析結果

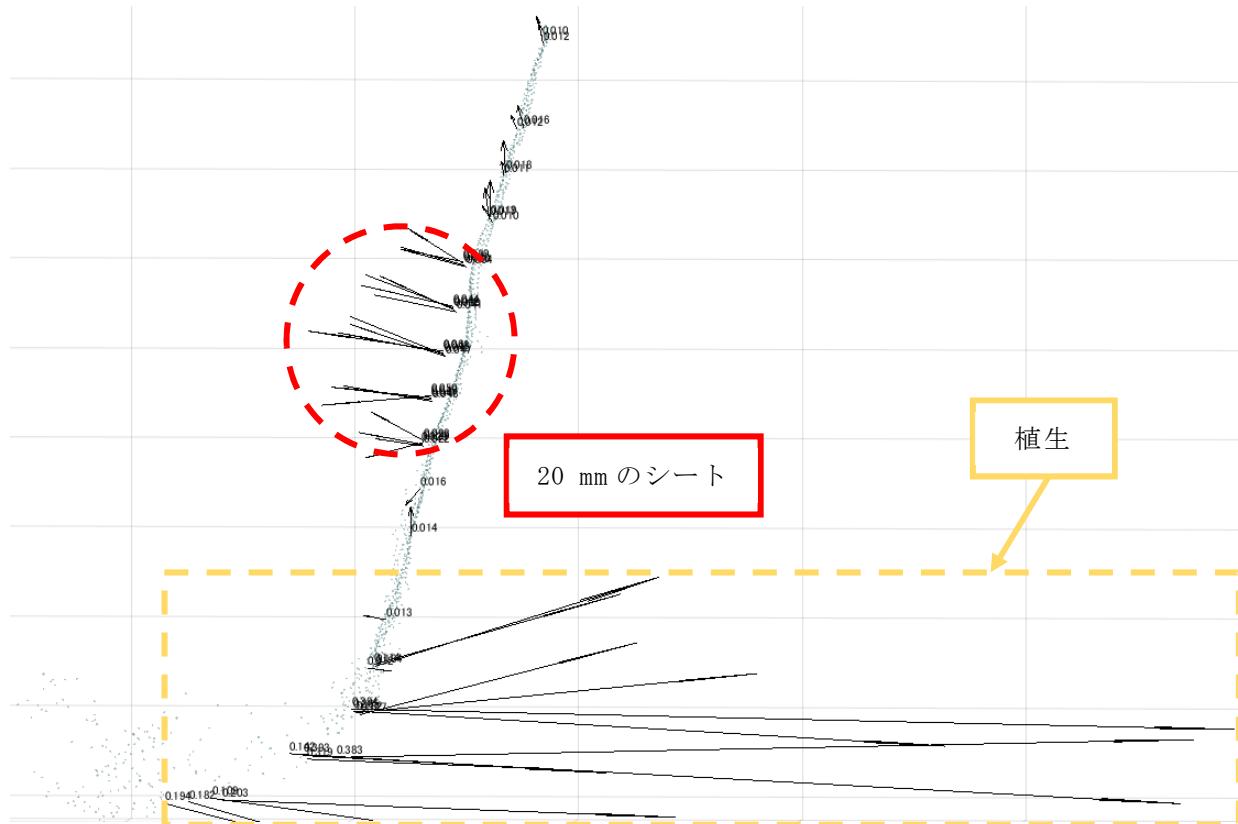


図- 4.9 フィルタリング前ののり枠 D 断面 (0.4m) の解析結果

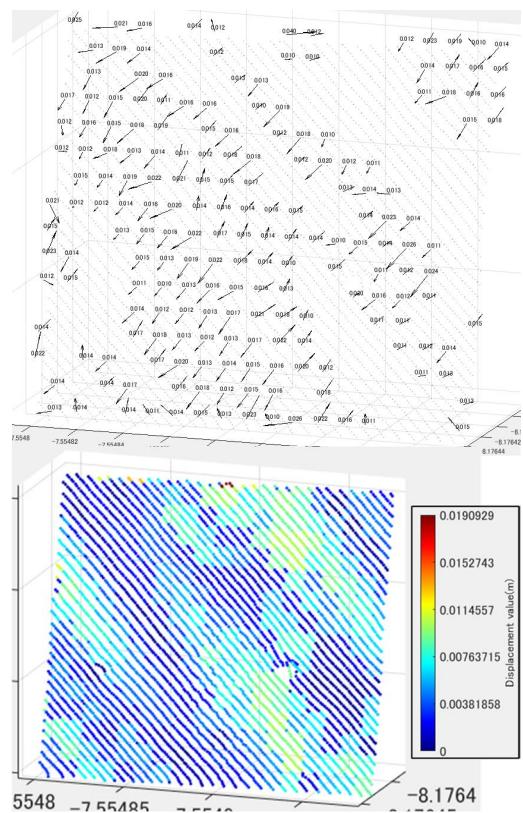


図- 4.10 フィルタリング後の  
のり枠 A の解析結果

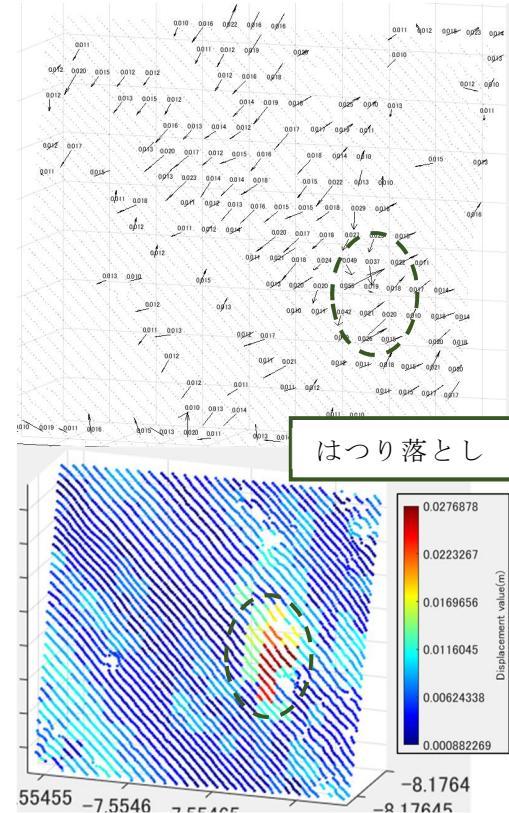


図- 4.11 フィルタリング後の  
のり枠 B の解析結果

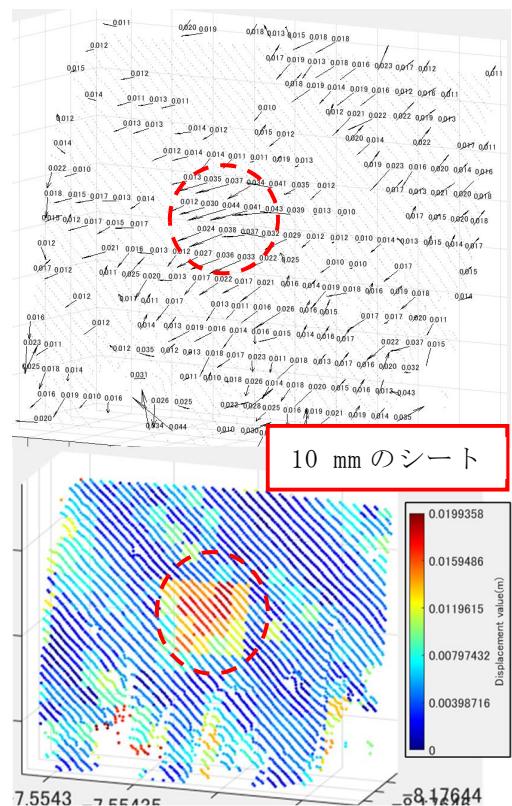


図- 4.12 フィルタリング後の  
のり枠 C の解析結果

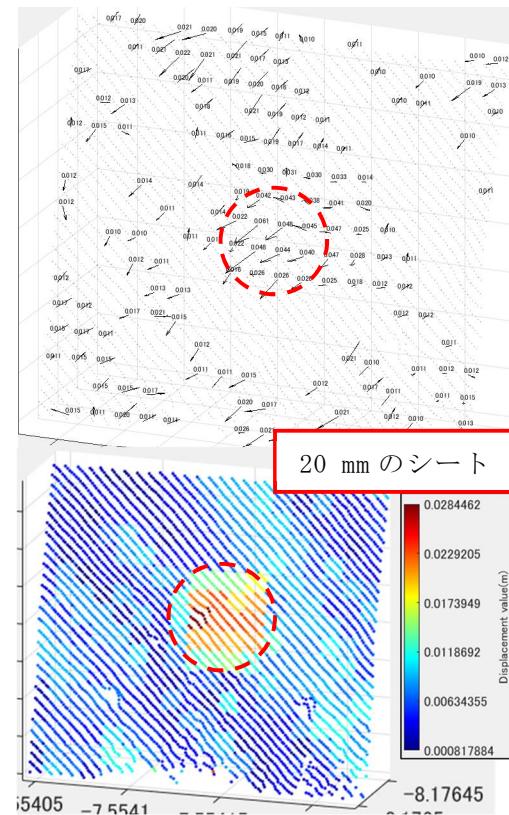


図- 4.13 フィルタリング後の  
のり枠 D の解析結果

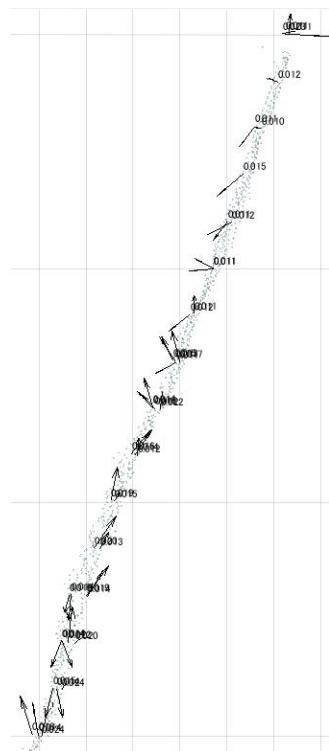


図-4.14 フィルタリング後ののり  
枠 A

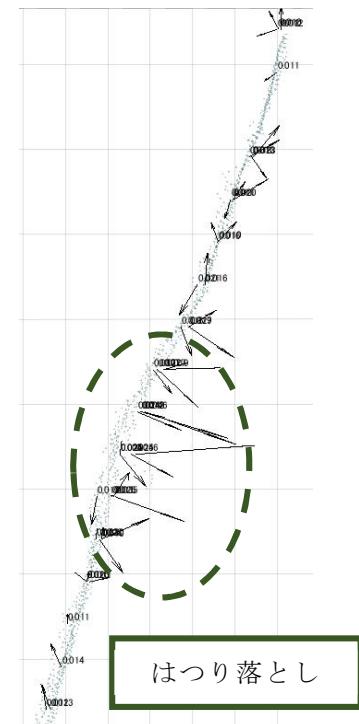


図-4.15 フィルタリング後ののり枠  
B

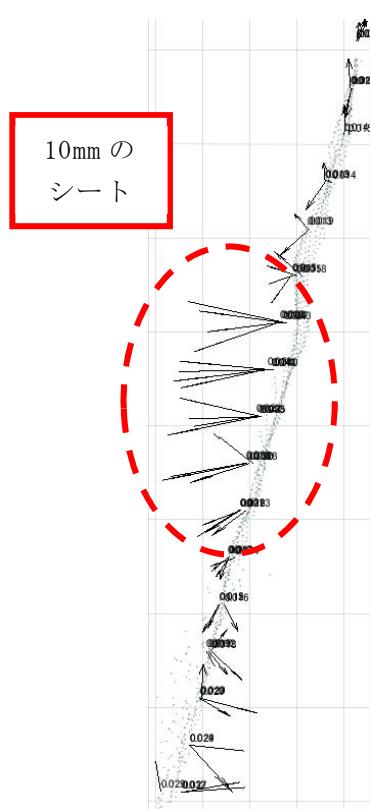


図-4.16 フィルタリング後ののり枠 C  
断面 (0.4m) の解析結果

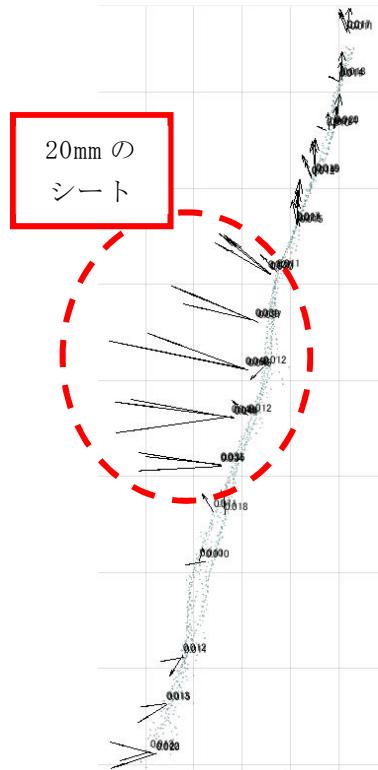


図-4.17 フィルタリング後ののり  
枠 D 断面 (0.4m) の解析結果

## 4.2 点群密度の変化によるのり面変状抽出の検証

本節では、前節の4つののり枠（フィルタリング前後）とCloudCompare<sup>15)</sup>内の点群を間引く機能であるSubsample機能を用いて、点群密度とのり面変状抽出の変化の関係を検証した。点群数を減少させることにより、解析時間の短縮を見込める。また本手法では1秒間に100万点のレーザスキャナを搭載しているが、そのレーザスキャナより1秒間に取得できる点群数が少ないものを用いた場合でも変状を抽出できるかを検証する。CloudCompare内のSubsample機能はRandomサンプリングとSpaceサンプリングがあり（図-4.18），この2つのサンプリング機能を使用して、1時期目と2時期目ののり枠内の点群をそれぞれ間引きした。

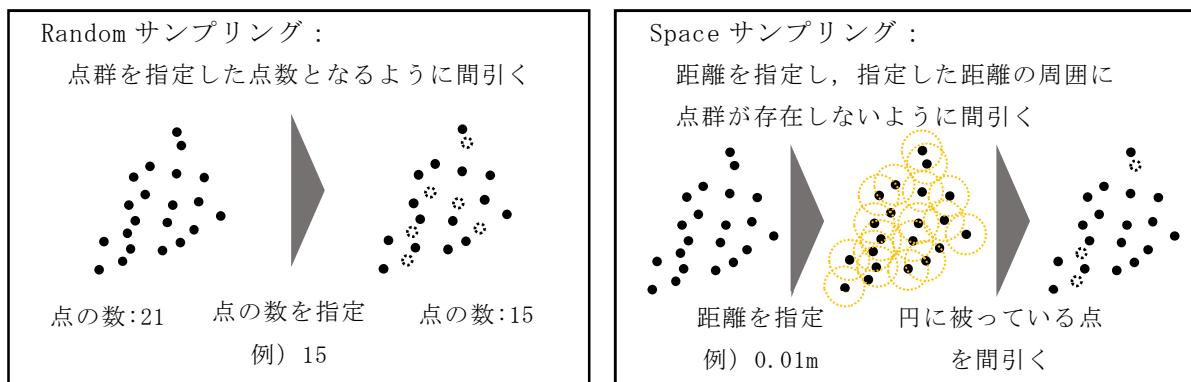


図- 4.18 Random サンプリングと Space サンプリングの仕組み

### (1) Randomサンプリング

Randomサンプリングとは指定した点数になるように点群をランダムに間引く機能である。フィルタリング前の点群にサンプリングを行なった結果の点群数を表-4.1に、フィルタリング後の点群にサンプリングを行なった結果の点群数を表-4.2に示している。表-4.1, 表-4.2内の①の点群はサンプリングを行なっていないものである。②, ③, ④のそれぞれの状態で前の点群数の半分になるように点群数を減少させた。本解析ではメッシュサイズを0.1mと設定した。

表- 4.1 フィルタリング前ののり枠の点群数 (Random サンプリング)

点群数	1 時期目 Random サンプリング			
	①	②	③	④
のり枠 A	5204	2602	1301	651
のり枠 B	5418	2709	1355	677
のり枠 C	5788	2894	1447	724
のり枠 D	5727	2864	1432	716
点群数	2 時期目 Random サンプリング			
	①	②	③	④
のり枠 A	4943	2472	1236	618
のり枠 B	5110	2555	1278	639
のり枠 C	5445	2723	1361	681
のり枠 D	5317	2659	1329	665

表- 4.2 フィルタリング後ののり枠の点群数 (Random サンプリング)

点群数	1 時期目 Random サンプリング			
	①	②	③	④
のり枠 A	4641	2321	1160	580
のり枠 B	5126	2563	1282	641
のり枠 C	4607	2304	1152	576
のり枠 D	4438	2219	1110	555
点群数	2 時期目 Random サンプリング			
	①	②	③	④
のり枠 A	4399	2200	1100	550
のり枠 B	4898	2449	1225	612
のり枠 C	4835	2418	1209	604
のり枠 D	4225	2113	1056	528

フィルタリングを行なわず, Random サンプリングを行なった点群の解析結果を図-4.19, 図-4.20 に示す. フィルタリングを行ない, Random サンプリングを行なった点群の解析結果を図-4.21, 図-4.22 に示す.

まずはフィルタリング前の図-4.19, 図-4.20 の結果について述べる. のり枠内に設置した変状はサンプリングを行なっていない①の段階でも確認することができない. 2 時期目ののり枠 C, D 内の右下付近に存在する植生は, 初期の①の点群数の 4 分の 1 にあたる③の状態の点群でも 2 時期間の変状として確認することができる. 続いてフィルタリング後の図-4.21, 図-4.22 の結果について述べる. のり枠内に設置した変状は①の段階で抽出することができている. 点群数を 2 分の 1 に減少させた②の点群でも変状を抽出することができている. ここで変状量のみ異なるのり枠 C と D の解析結果を比較すると, 変状量が 20mm である箇所がはっきりとした変化で表れている.

以上より, 本検証における変状はフィルタリングを行なった場合, 元の 2 分の 1 の点群数でも変状を抽出できることが確認できた.

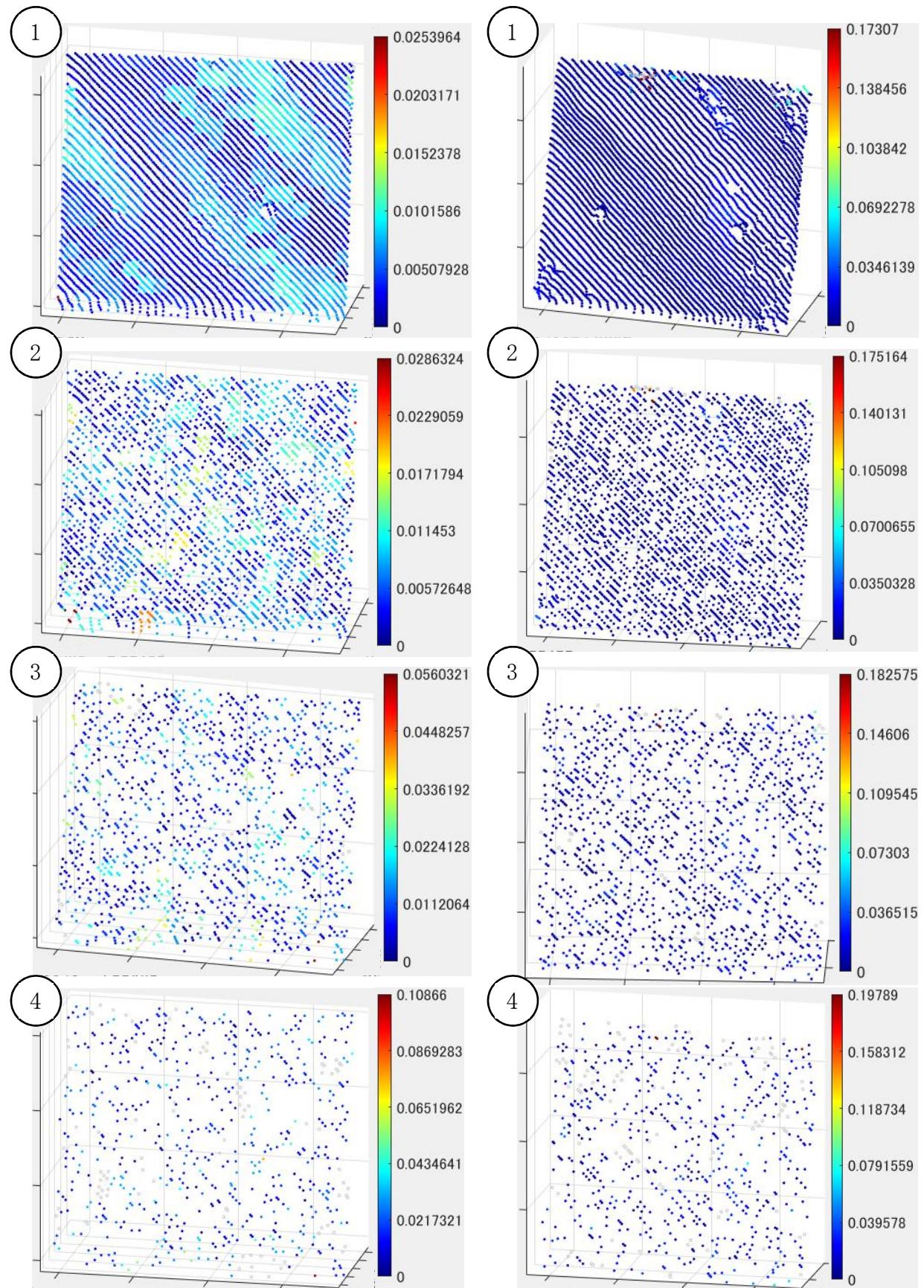


図- 4.19 フィルタリング前ののり枠点群に Random サンプリングを行なった解析結果  
 左①～④：のり枠 A, 右①～④：のり枠 B (単位は m)

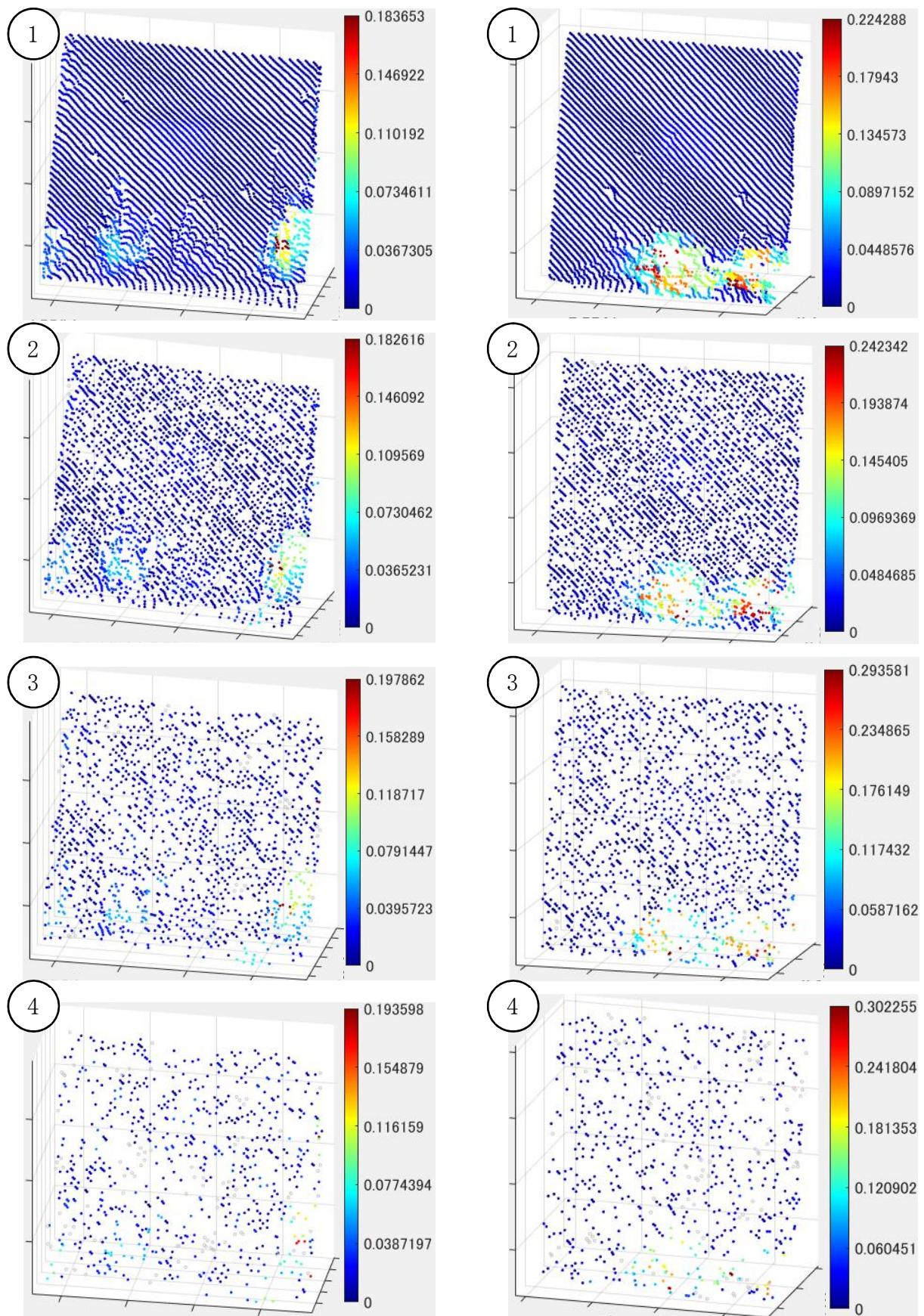


図- 4.20 フィルタリング前ののり枠点群に Random サンプリングを行なった解析結果  
 左①～④：のり枠 C, 右①～④：のり枠 D (単位は m)

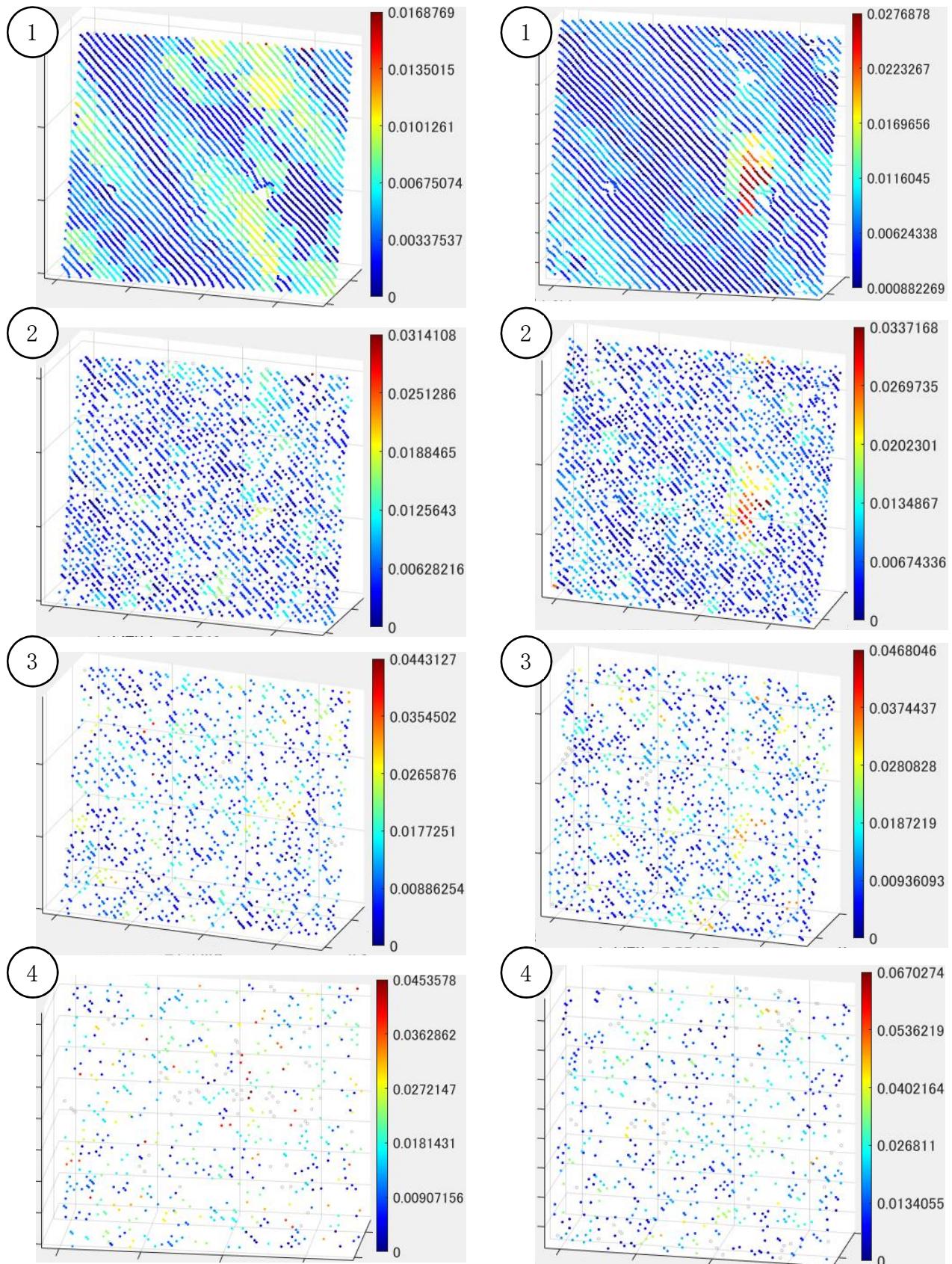


図- 4.21 フィルタリング後ののり枠点群に Random サンプリングを行なった解析結果  
左①～④：のり枠 A, 右①～④：のり枠 B (単位は m)

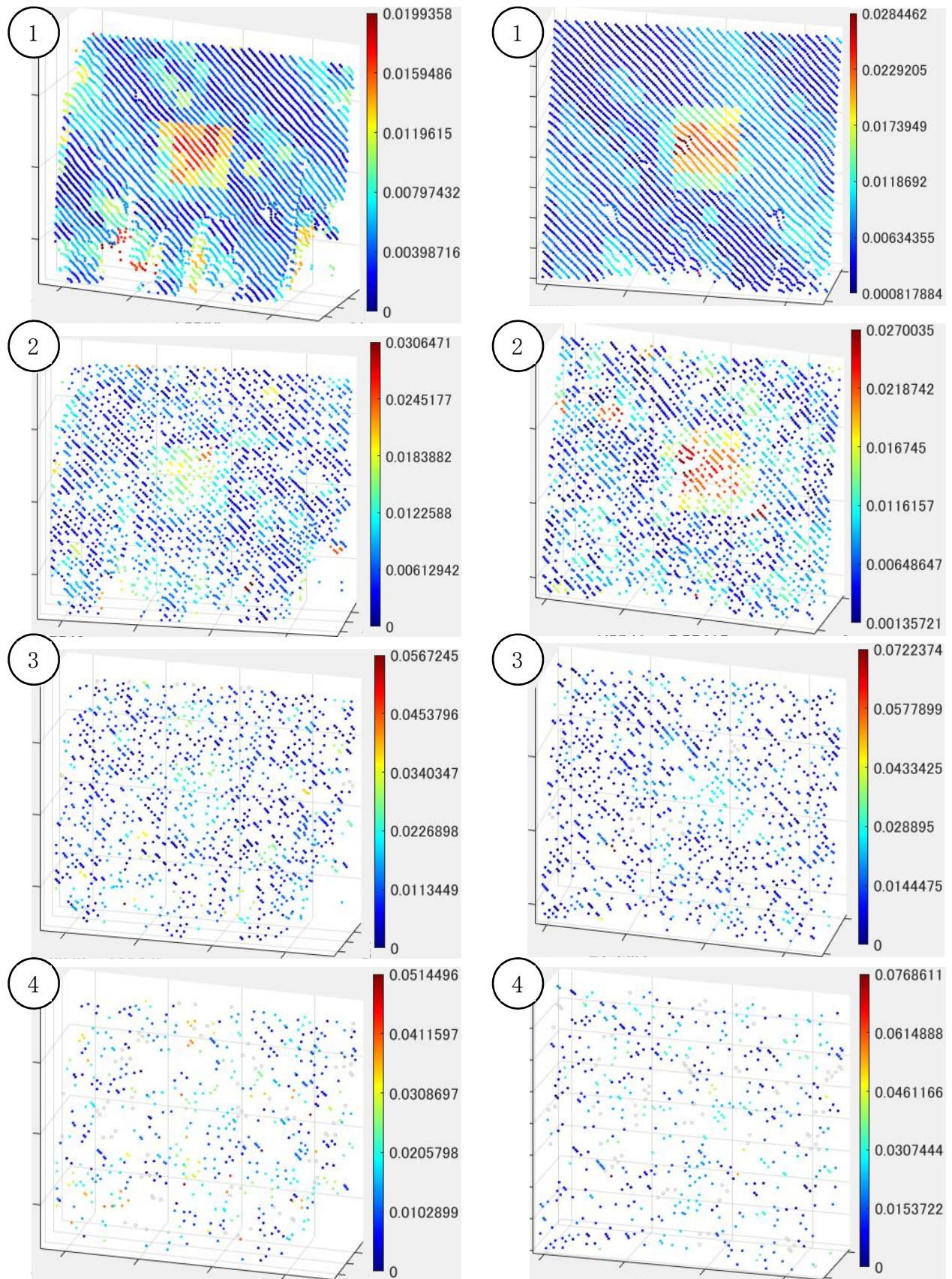


図- 4.22 フィルタリング後ののり枠点群に Random サンプリングを行なった解析結果  
左①～④：のり枠 C, 右①～④：のり枠 D (単位は m)

## (2) Spaceサンプリング

Space サンプリングとは、2点間の最小距離を設定することで、その値よりも別の点と近くならないように点群を間引きする機能である。2点間の最小距離が大きいほど、保持される点群数は少なくなる。本検証では、表-4.3、表-4.4のように合計で7段階のサンプリングを行なった。表内の①ではのり枠のSpace サンプリングを行なわず、②から⑦では表の通り、2点間の最小距離を0.02 m, 0.03 m, 0.04 m, 0.05 m, 0.06 m, 0.07 mと設定して、それぞれののり枠点群でその値に近づく値を設定してサンプリングを行なう。Random サンプリング同様にフィルタリング前後の点群を利用して解析を行なう。本解析ではメッシュサイズを0.1 mと設定した。

表- 4.3 フィルタリング前ののり枠の点群数 (Space サンプリング)

点間距離 / 点群数	1 時期目 Space サンプリング						
	①なし	②0.02 m	③0.03 m	④0.04 m	⑤0.05 m	⑥0.06 m	⑦0.07 m
のり枠 A	5204	2736	2297	1808	1090	722	545
のり枠 B	5418	2869	2700	1854	1203	783	587
のり枠 C	5788	3444	2751	2127	1398	904	707
のり枠 D	5727	3409	2730	2097	1374	900	717
点間距離 / 点群数	2 時期目 Space サンプリング						
	①なし	②0.02 m	③0.03 m	④0.04 m	⑤0.05 m	⑥0.06 m	⑦0.07 m
のり枠 A	4943	2587	2231	1736	1149	749	526
のり枠 B	5110	2674	2569	1774	1080	783	560
のり枠 C	5445	2981	2580	1902	1247	866	599
のり枠 D	5317	2825	2616	1922	1293	920	604

表- 4.4 フィルタリング後ののり枠の点群数 (Space サンプリング)

点間距離 / 点群数	1 時期目 Space サンプリング						
	①なし	②0.02 m	③0.03 m	④0.04 m	⑤0.05 m	⑥0.06 m	⑦0.07 m
のり枠 A	4641	2358	1931	1501	850	585	461
のり枠 B	5126	2720	2407	1689	963	659	534
のり枠 C	4607	2497	2209	1571	901	610	494
のり枠 D	4438	2283	2014	1465	854	596	468
点間距離 / 点群数	2 時期目 Space サンプリング						
	①なし	②0.02 m	③0.03 m	④0.04 m	⑤0.05 m	⑥0.06 m	⑦0.07 m
のり枠 A	4399	2223	1870	1485	915	606	454
のり枠 B	4898	2549	2318	1663	996	647	519
のり枠 C	4835	2454	2241	1625	987	708	501
のり枠 D	4225	2150	1883	1434	931	616	455

フィルタリングを行なわず, Space サンプリングで点群の間引きを行なった点群の解析結果を図-4.23, 図-4.24, 図-4.25, 図-4.26 に示す. のり枠 A の解析結果では①, ②, ③の段階では変状が生じていない. しかし, ④, ⑤の段階になると局所的に変状が表れているように見られる. これは本来, 1 時期目と 2 時期目で対応していた箇所の点群が, それぞれのサンプリングによって除去されてしまい, ①の点群分布より遠くの点と点が対応付けられたことが原因であると考えられる. のり枠 B では上部の氷柱の影響により, はつり落としの変状が表れていない. のり枠 C, D ではフィルタリング前の Random サンプリングの解析結果同様に, 10 mm, 20 mm 厚のシートが変状として抽出されておらず, 植生が 2 時期間の変化として表れている.

フィルタリングを行ない, Space サンプリングで点群の間引きを行なった点群の解析結果を図-4.27, 図-4.28, 図-4.29, 図-4.30 に示す. のり枠 A では①～④では変状を確認できないが, ⑤～⑦ではフィルタリング前の解析結果同様に局所的に変状が見られる. のり枠 B では 2 点間の最小距離が 0.04 m である④まで①同様に変状を抽出することができている. ⑤の解析結果においても変状は見られるが, はつり落としの変状付近以外でも変状が表れている. のり枠 C, D の解析結果について述べる. のり枠 C では 2 点間の最小距離が 0.04 m である④まで変状を抽出でき, のり枠 D では 0.05 m である⑤まで変状を抽出することができた.

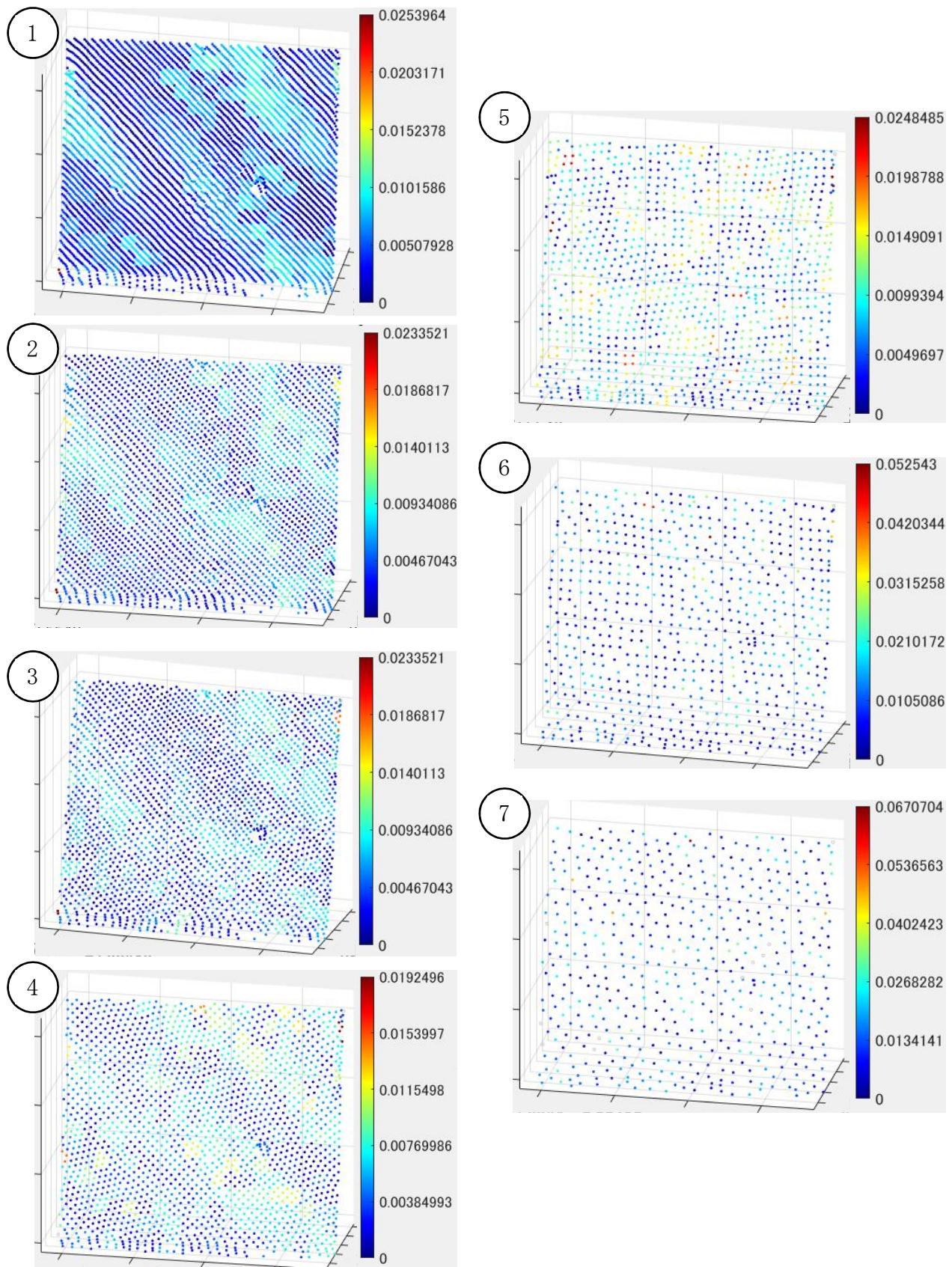


図- 4.23 フィルタリング前のり枠点群に Space サンプリングを行なった解析結果  
のり枠 A (単位は m)

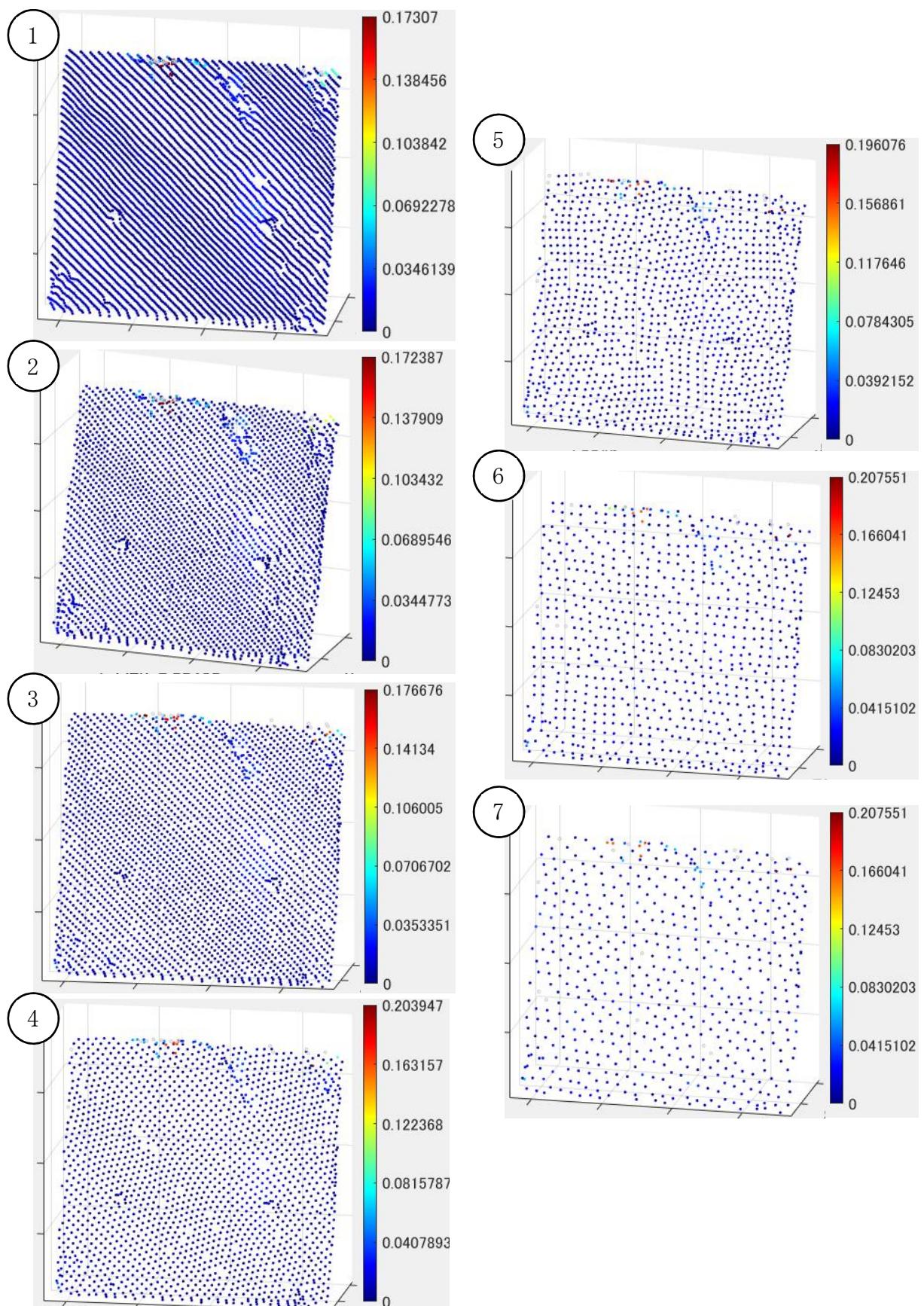


図 -4.24 フィルタリング前のり枠点群に Space サンプリングを行なった解析結果  
のり枠 B (単位は m)

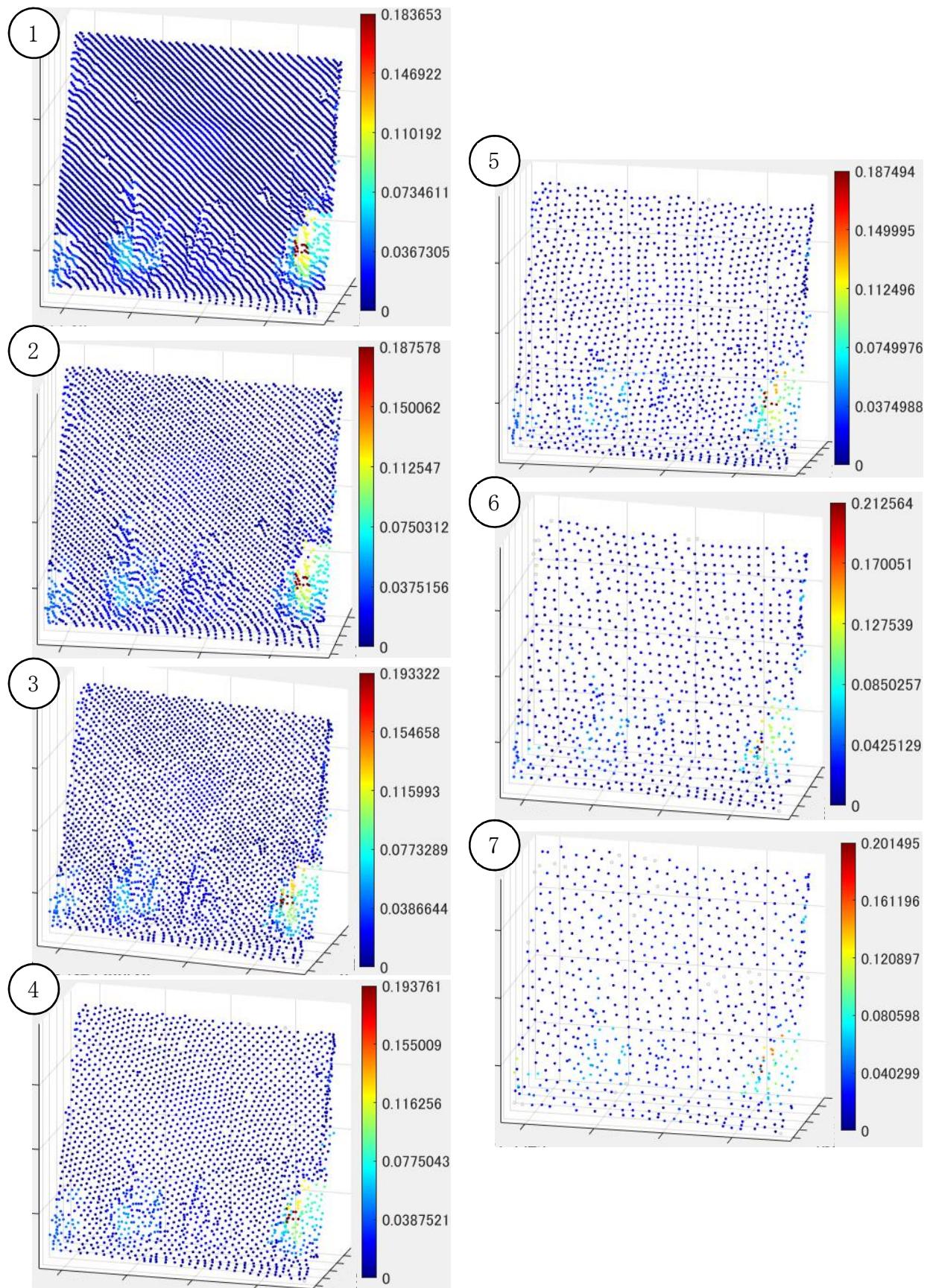


図- 4.25 フィルタリング前ののり枠点群に Space サンプリングを行なった解析結果  
のり枠 C (単位は m)

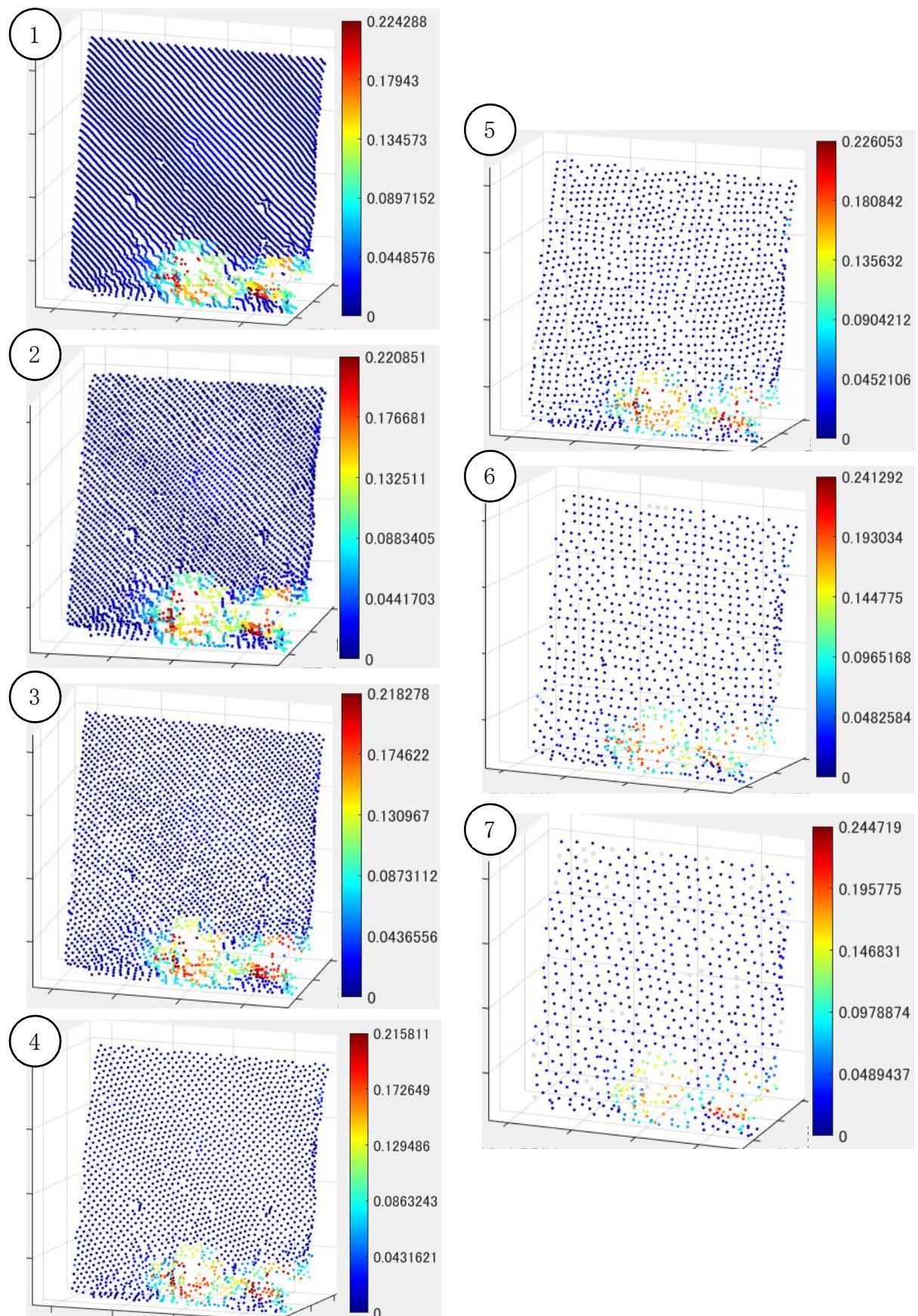


図- 4.26 フィルタリング前のり枠点群に Space サンプリングを行なった解析結果  
のり枠 D (単位は m)

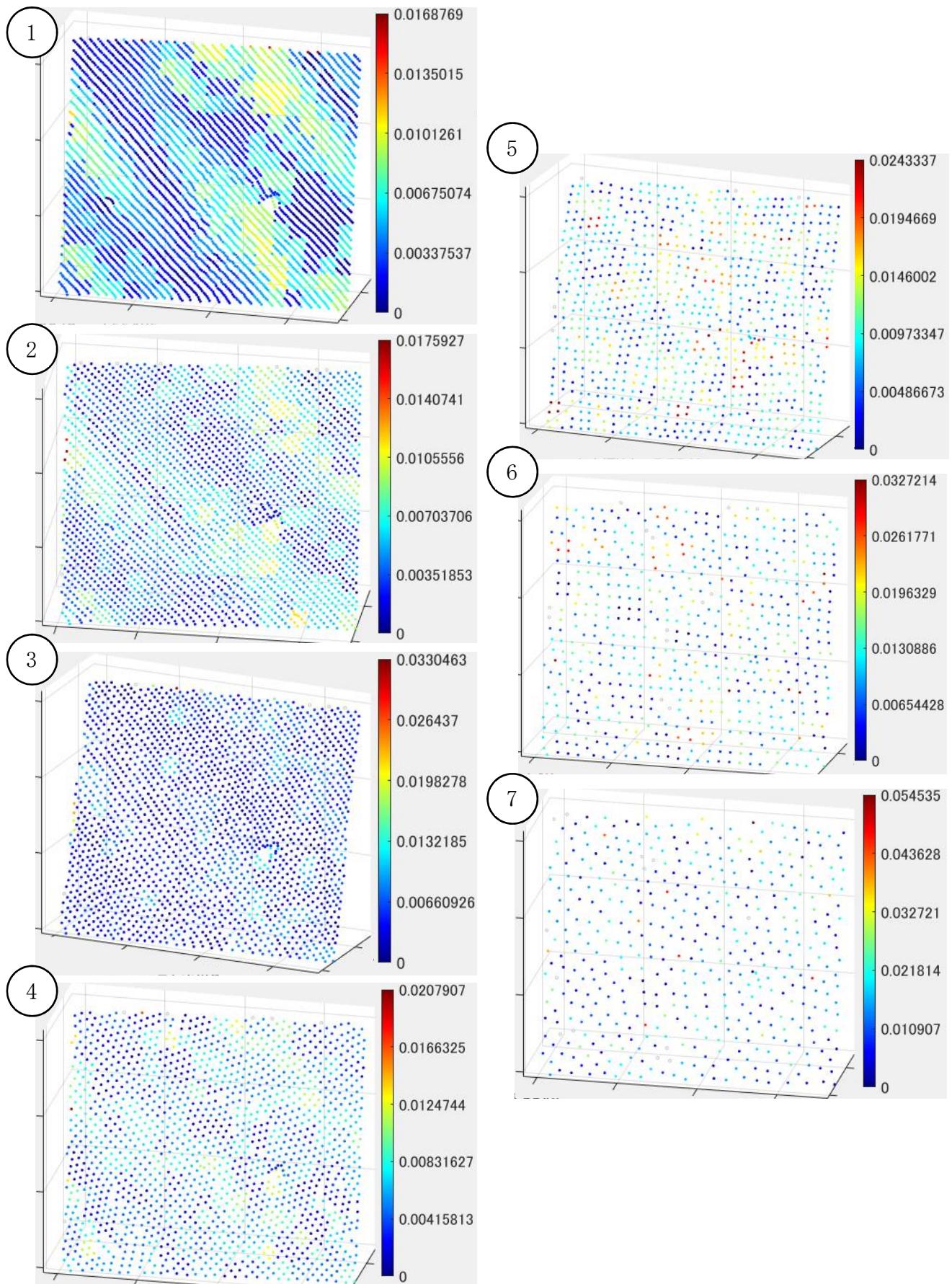


図- 4.27 フィルタリング後ののり枠点群に Space サンプリングを行なった解析結果  
のり枠 A (単位は m)

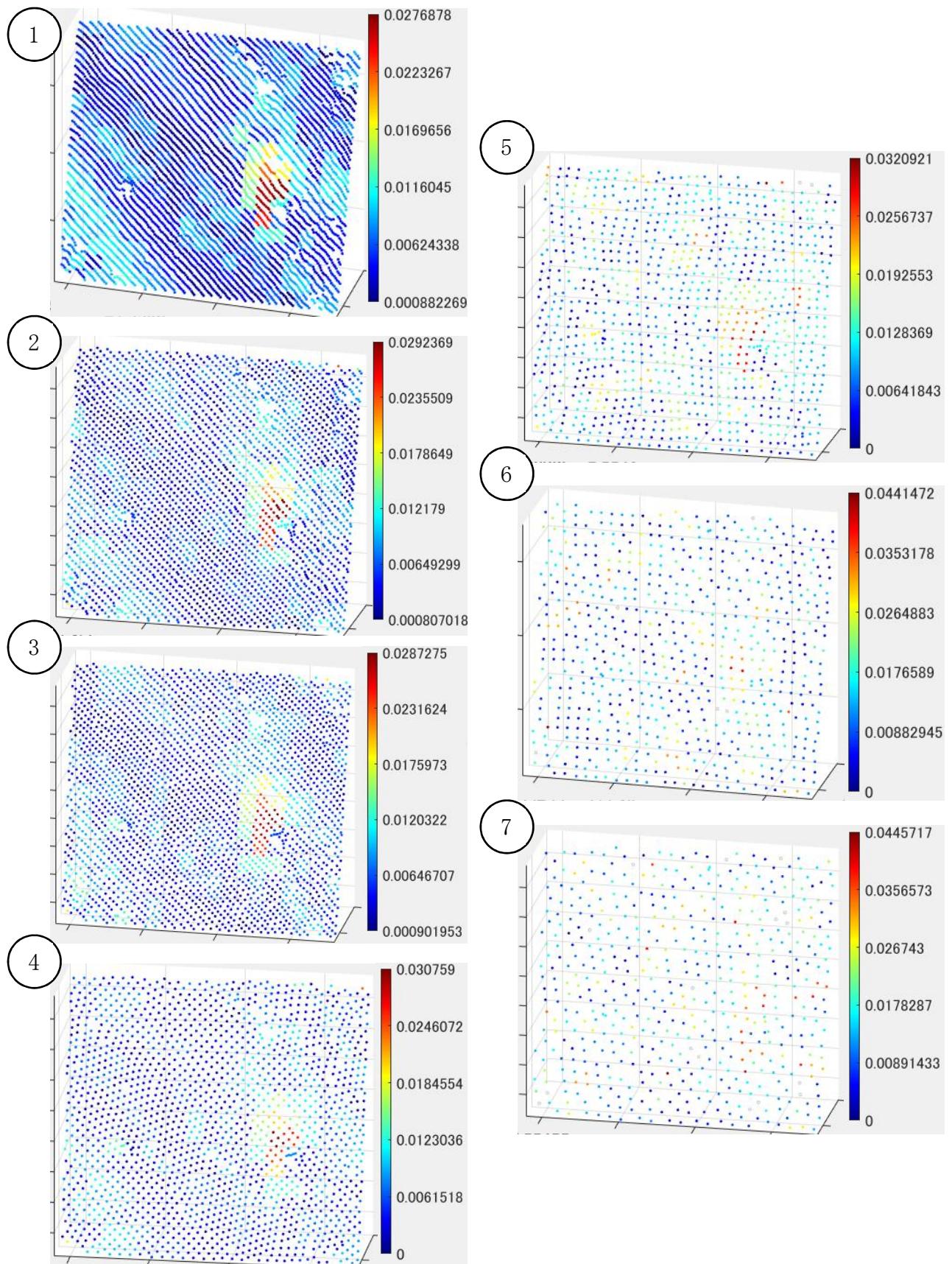


図- 4.28 フィルタリング後のり枠点群に Space サンプリングを行なった解析結果  
のり枠 B (単位は m)

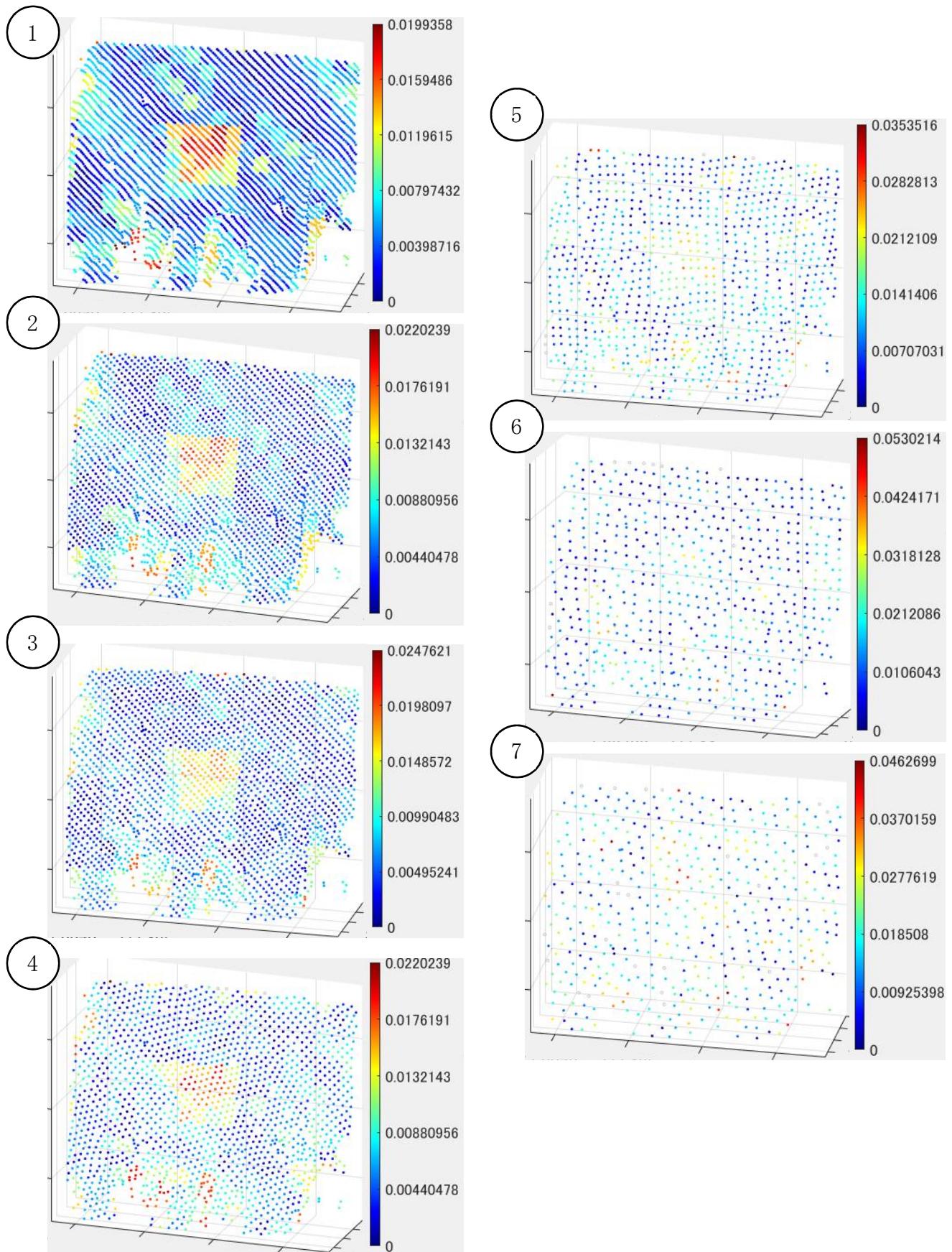


図- 4.29 フィルタリング後のり枠点群に Space サンプリングを行なった解析結果  
のり枠 C (単位は m)

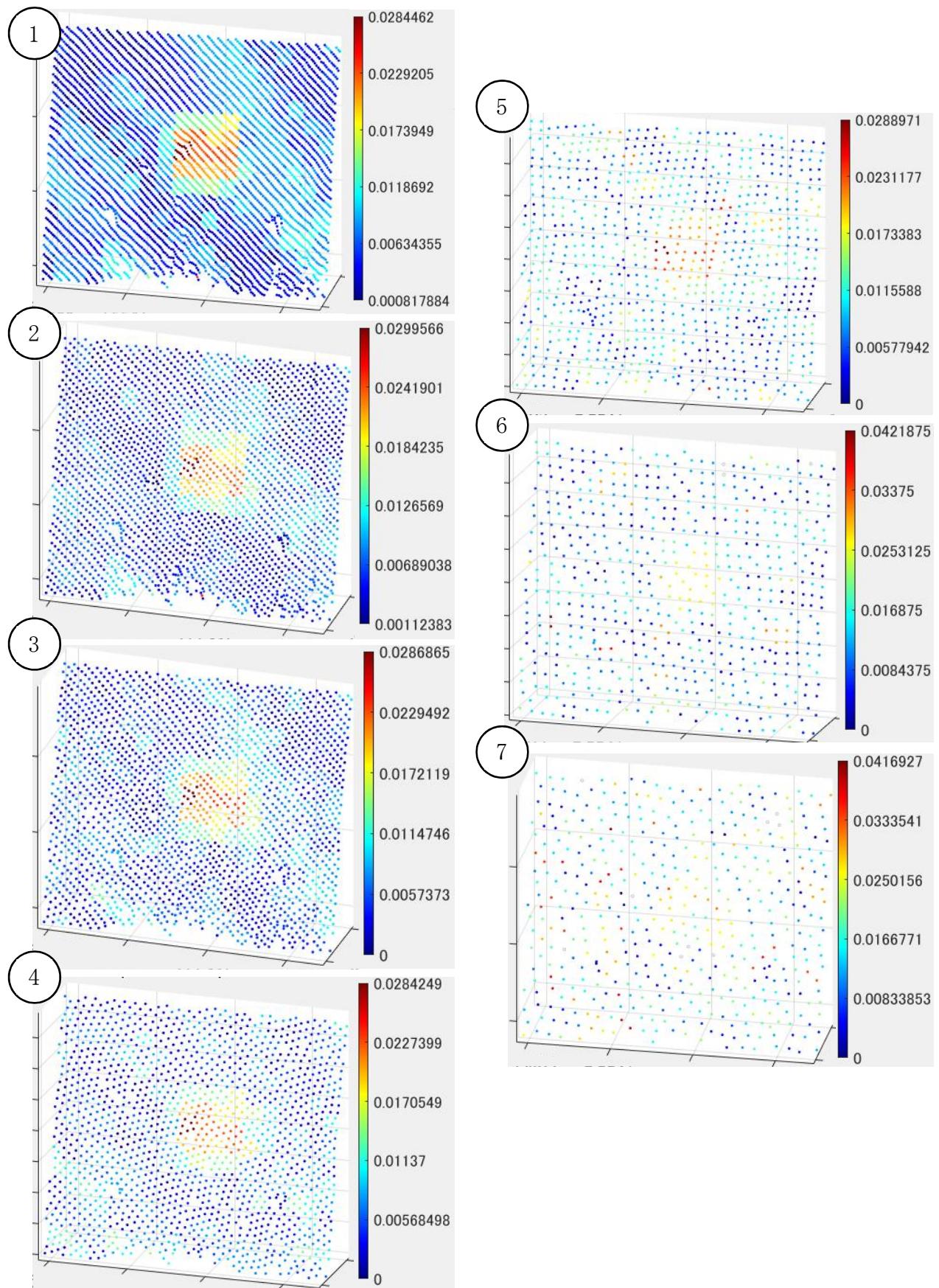


図- 4.30 フィルタリング後ののり枠点群に Space サンプリングを行なった解析結果  
のり枠 D (単位は m)

## 第5章 変状抽出の検証

本章では、応用検証として実在するのり面や地物を使用した変状抽出の検証をし、維持管理実用化へ向けての検証も行う。

### 5.1 広域のり面を対象とした変状抽出の検証

本節では、第4章にて使用したのり枠 A, B, C, D を含むのり面を対象に 2 時期間ののり面変状の抽出を検証した。第4章同様に 1 時期目には模擬変状を設置せず、2 時期目ののり枠 B, C, D にはそれぞれの模擬変状を設置した。この 2 時期間ののり面を ICP 手法により、変状抽出する。

#### (1) 検証概要

ICP 手法による解析を行なうにあたり、使用するのり面点群にフィルタリング、サンプリング、そして解析に変状の上限設定を行ない、表-5.1 のように合計 6 つの解析を行なう。フィルタリングを行なうことにより、のり面表面の植生や防護柵、電線などの点群を削除した（図-5.1）。サンプリングは Random サンプリングと Space サンプリングの 2 種類を行なう（表-5.2、表-5.3）。変状の上限設定は  $\pm 0.05$  m でカラーマップが表示されるように設定した。これらの変更を加えることにより、模擬変状を変状として抽出できるか、変状を明瞭化できるかを検証する。

表- 5.1 広域のり面を対象とした変状抽出の検証における解析一覧

上限設定		なし		あり	
フィルタリング		前	後	前	後
サンプリング	Random	図- 5.2	図- 5.2	図- 5.5	図- 5.5
	Space	図- 5.3	図- 5.4	図- 5.6	図- 5.7

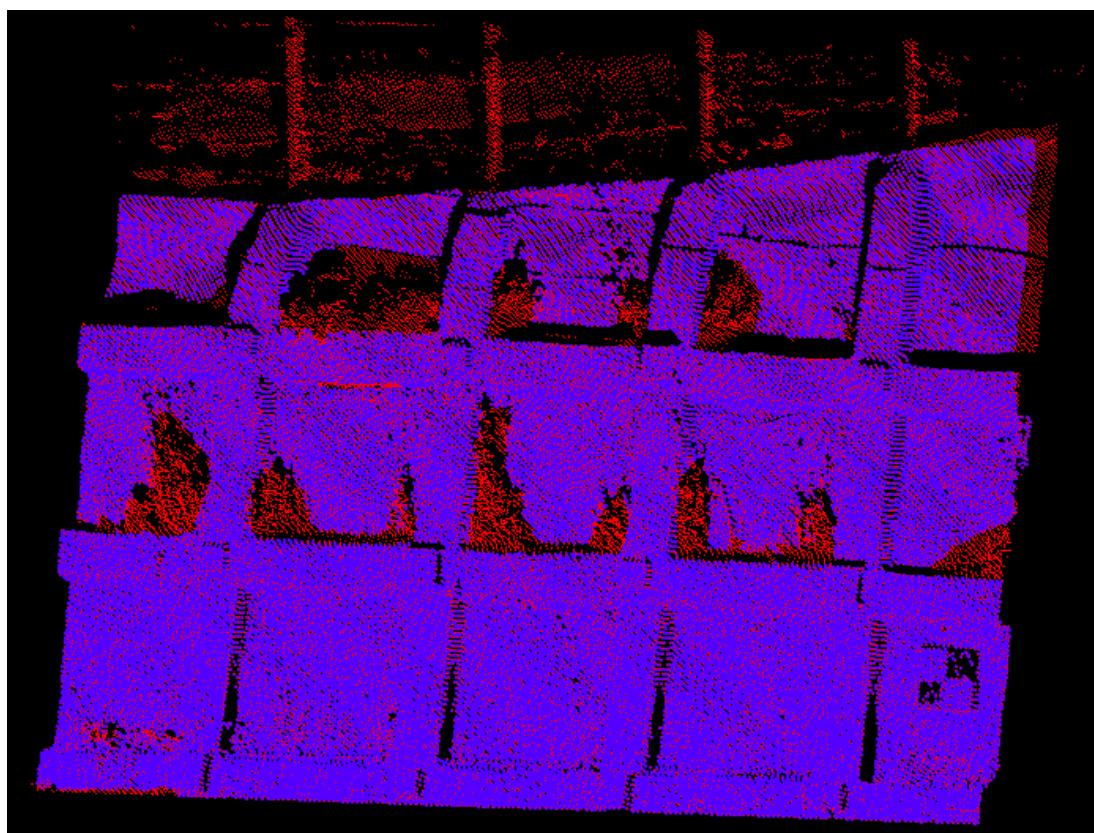


図- 5.1 フィルタリング前後の1時期目のり面点群の様子  
(赤: フィルタリング前, 青: フィルタリング後)

表- 5.2 Random サンプリング後ののり面の点群数

フィルタ リング	Random サンプリング後ののり面の点群数				
	-	①なし	②*0.5	③*0.5	④*0.5
前	1 時期目	111511	55756	27878	13939
	2 時期目	107224	53612	26806	13403
後	1 時期目	98011	49006	24503	12251
	2 時期目	92731	46366	23183	11591

表- 5.3 Space サンプリング後ののり面の点群数

フィルタ リング	Space サンプリング後ののり面の点群数							
	点間距離	①なし	②0.02 m	③0.03 m	④0.04 m	⑤0.05 m	⑥0.06 m	⑦0.07 m
前	1 時期目	111511	74801	54457	37760	23443	16264	11967
	2 時期目	107224	71884	52370	37821	23967	16509	11854
後	1 時期目	98011	62933	44737	29885	17733	12011	8644
	2 時期目	92731	59240	42141	29384	17832	11933	8343

## (2) 検証結果

広域のり面の解析結果について述べる。

まずは、図-5.2について述べる。Random サンプリングを行なったフィルタリング前後の解析結果である。フィルタリング前の結果において、中央上部に存在する赤や青の点群（大きな変状）は電線である。この変状がほかの変状と比べ、特に大きな値となっているため、のり面上に設置した模擬変状の様子を確認できない。フィルタリング後の結果では模擬変状の様子を確認することができる。変状なし、のり面奥方向への変状、のり面手前方向への変状を全て確認できる。フィルタリングで点群を除去された箇所である植生は、フィルタリングにより対応する点群が存在せず、変状として表れている。続いて、図-5.3、図-5.4のSpace サンプリングの解析結果について述べる。フィルタリング前の解析結果では変状を抽出することができない。フィルタリング後ではSpace サンプリングで最小点群間距離が0.04 mであっても変状を抽出することができている。続いて、図-5.5の結果について述べる。Random サンプリングを行なったフィルタリング前後の解析結果である。図内に表示している変状は±0.05 m内である。黒色で表示されている点群は±0.05 m外の変状である。フィルタリング前後の結果について比較する。フィルタリング前の結果においては1、2 時期間で大きな変化があったとされる植生の箇所と十分に点群を取得できていない防護柵の箇所が±0.05 m以上の変状として表されている。一方、フィルタリング後の結果においてはそれらの箇所を削除しているため、図内には存在しない。フィルタリング前後どちらの図においても、元の点群の4分の1の数になったとしても変状を確認することができる。続いて、図-5.6、図-5.7の結果について述べる。こちらの図も同様に上限設定ありで解析を行なったものである。フィルタリング前後の両方の解析で模擬変状を確認することができる。またSpace サンプリングにおいては最小点群間距離が0.04 mであっても変状を確認することができた。以上より、フィルタリング前の状態であっても変状の上限を設定することで変状抽出が可能のこと、またサンプリングにより点群数を元の3分の1まで減少させても変状を抽出できることがわかった。

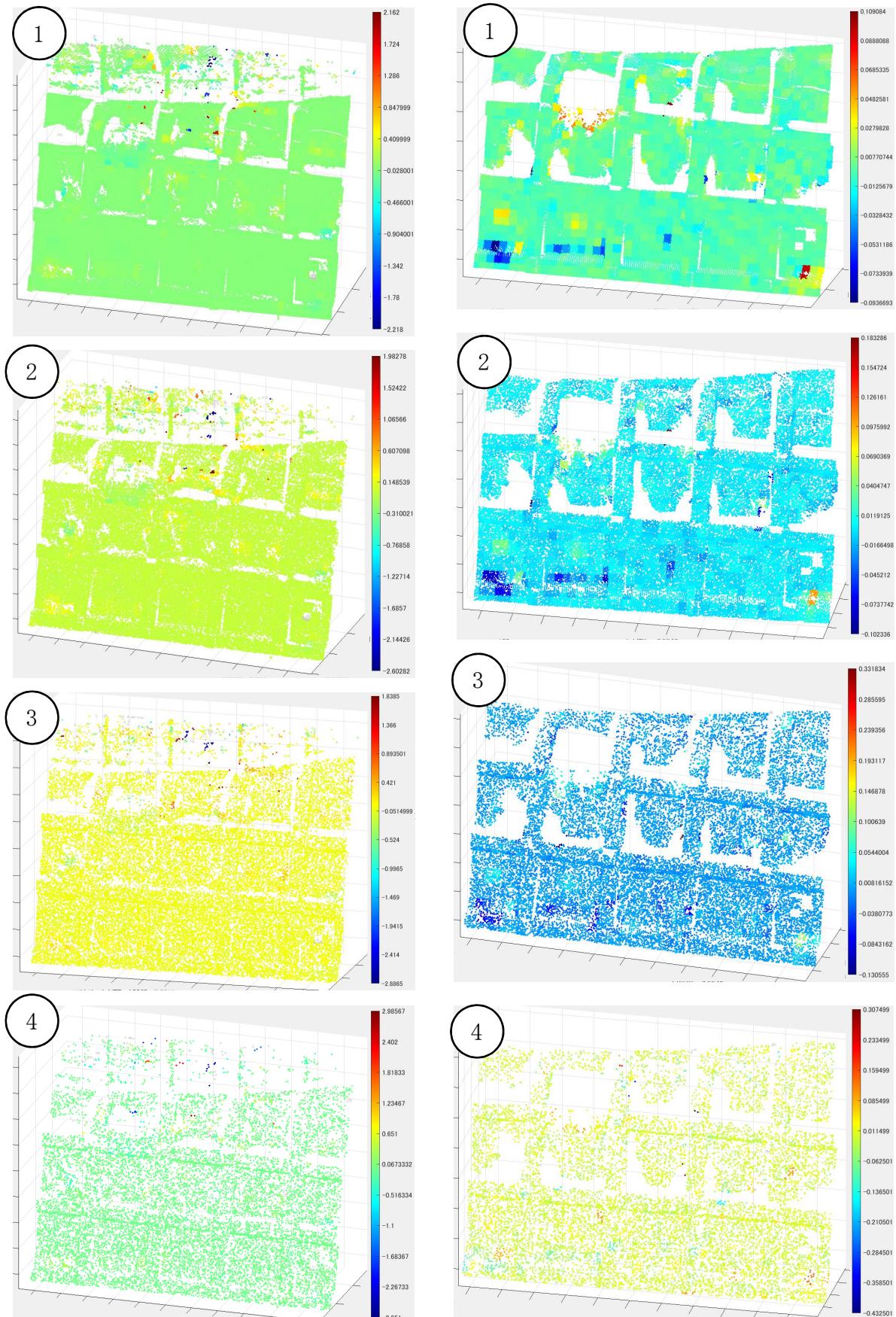


図- 5.2 Random サンプリングを行なった解析結果  
左 : フィルタリング前, 右 : フィルタリング後 (単位は m)

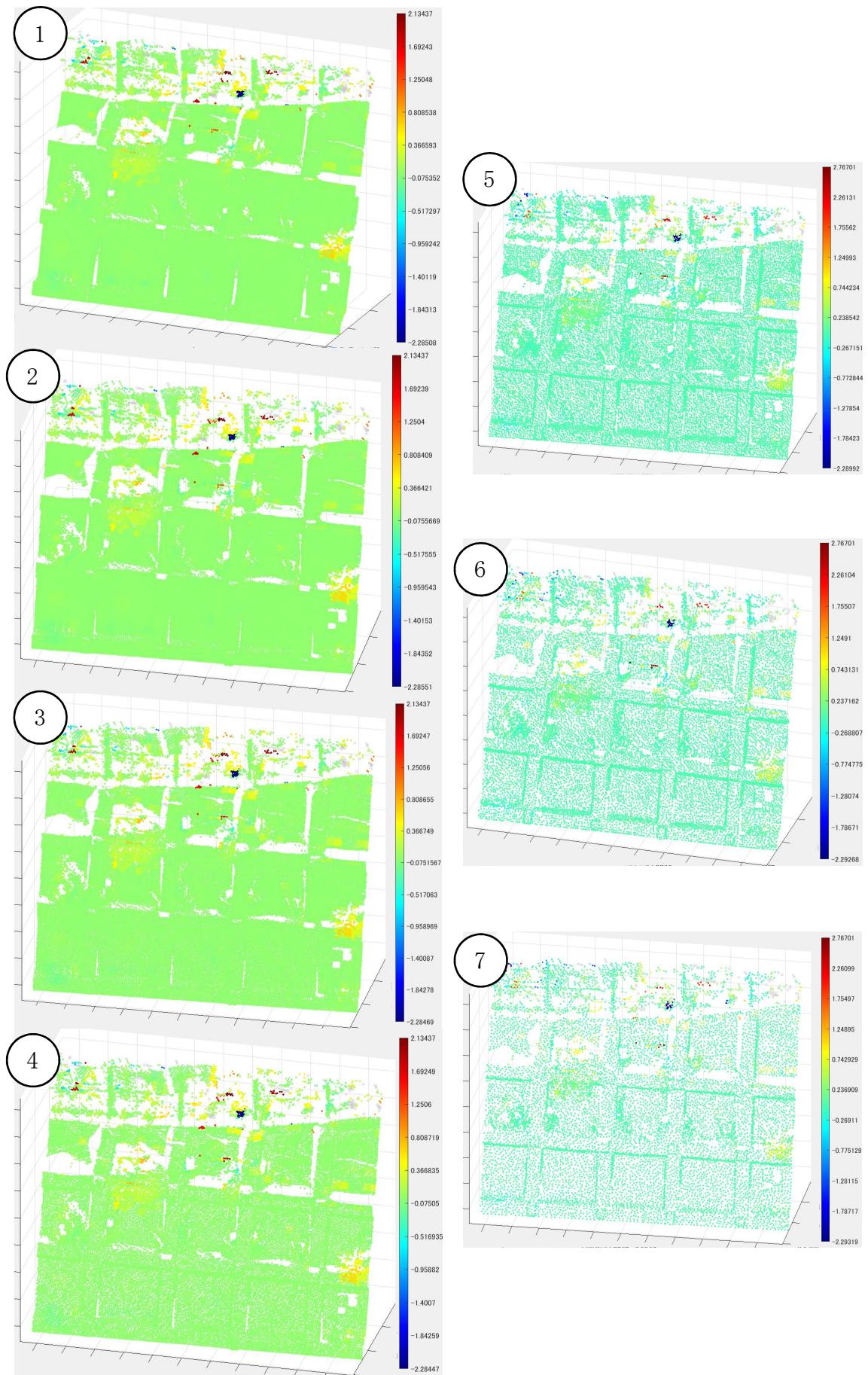


図- 5.3 フィルタリング前の Space サンプリングを行なった解析結果（単位は m）

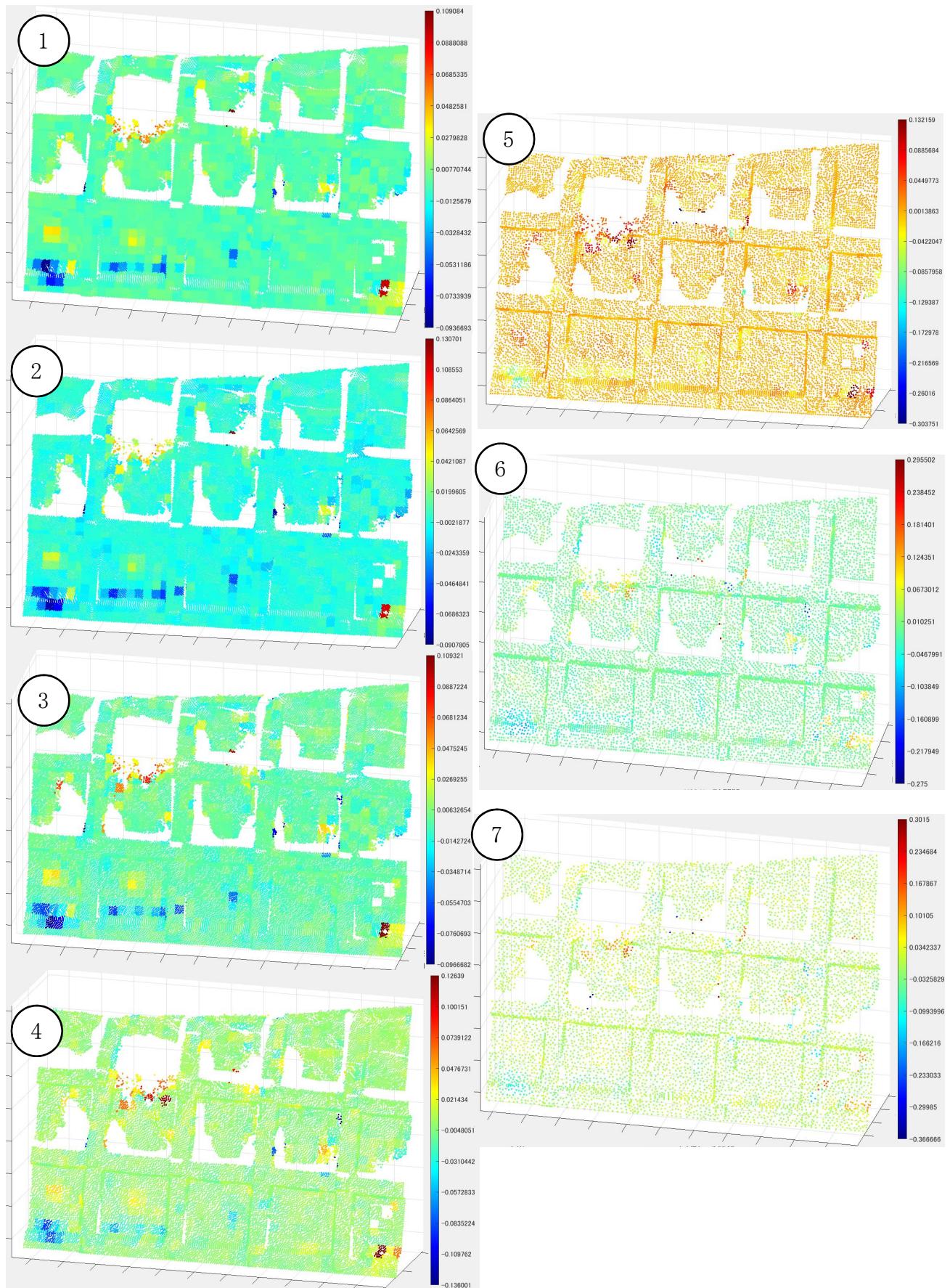


図- 5.4 フィルタリング後の Space サンプリングを行なった解析結果（単位は m）

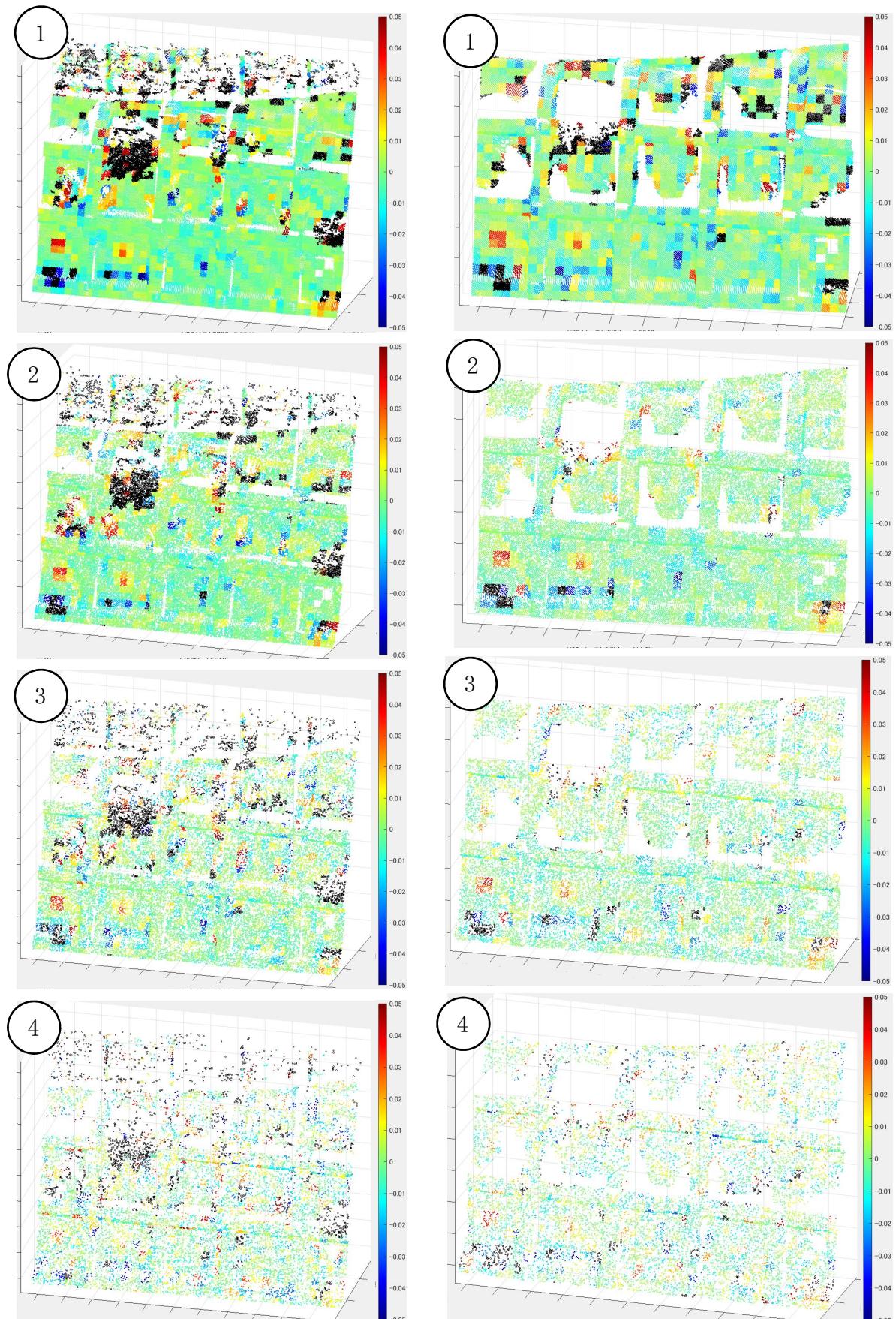


図- 5.5 のり面点群に Random サンプリングを行なった解析結果（カラーマップの変状を土 0.05m で表示）左：フィルタリング前，右：フィルタリング後（単位は m）

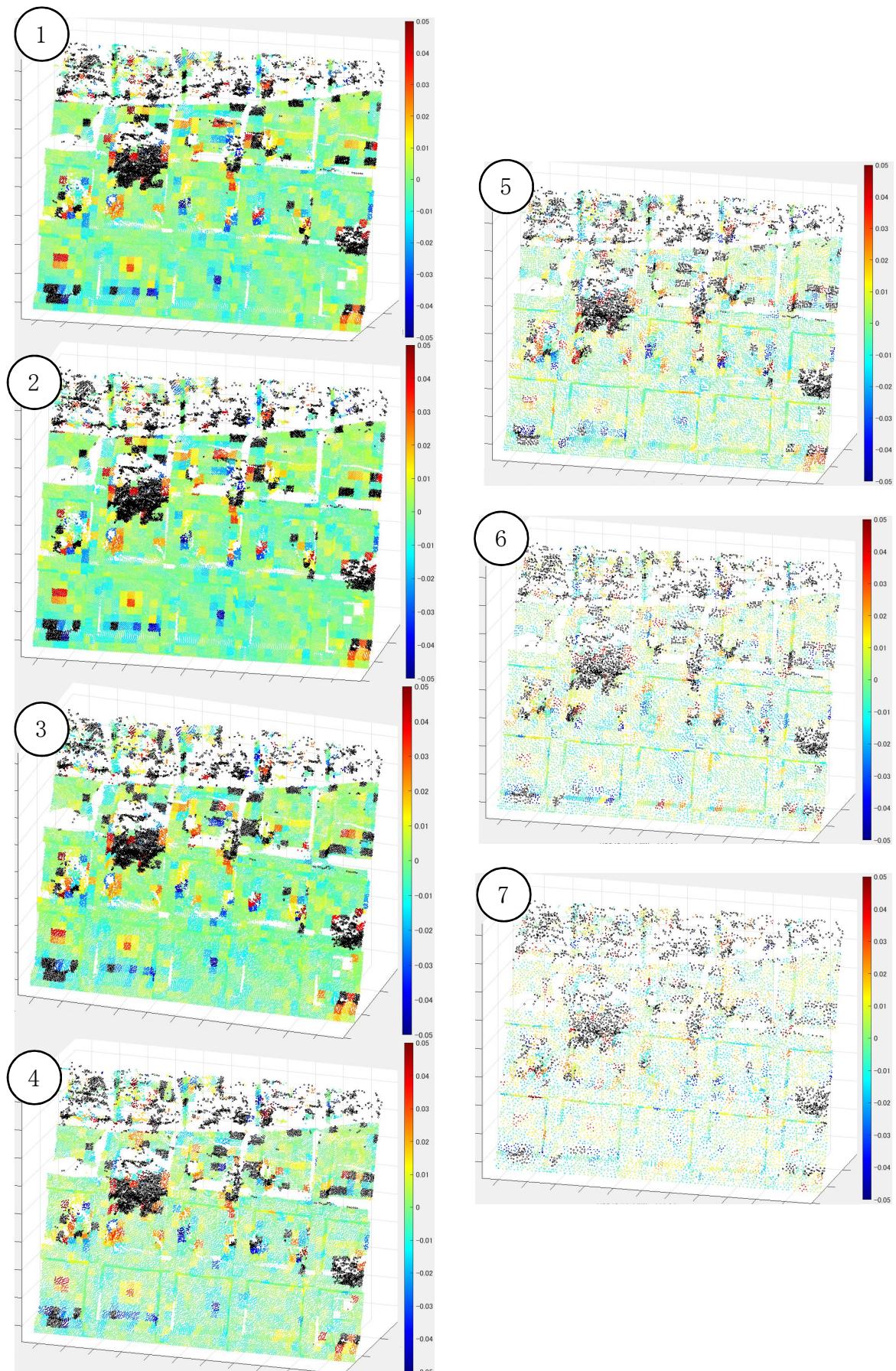
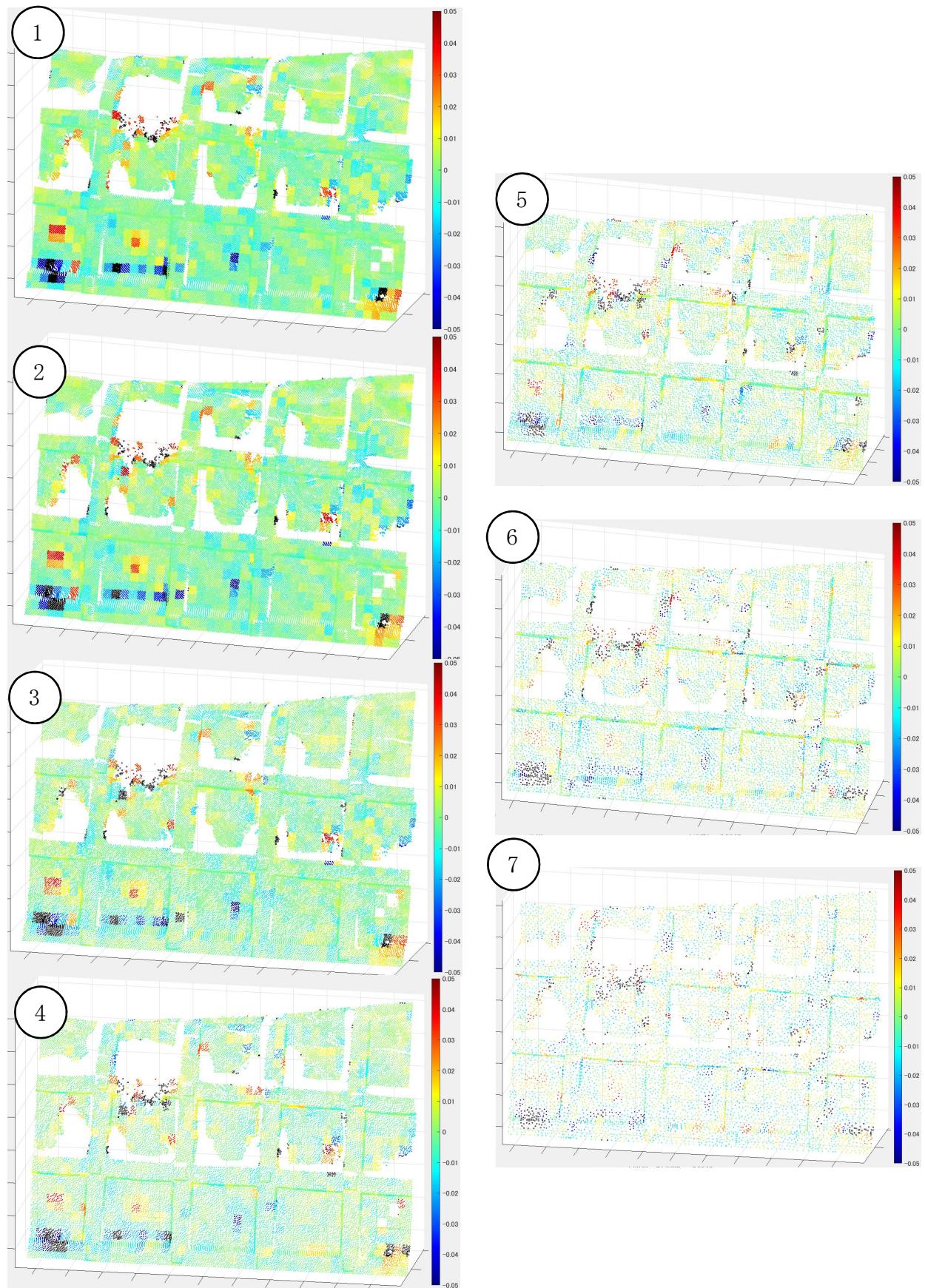


図- 5.6 フィルタリング前の面点群に Space サンプリングを行なった解析結果  
(カラーマップの変状を±0.05m で表示) (単位は m)



## 5.2 アンカーを施したのり面を対象とした変状抽出の検証

本節では、2 時期目の計測以降にのり面対策工を施したのり面を解析の対象として検証を行なった。こののり面を3 時期目ののり面と呼称することとする。この3 時期目ののり面は 2018 年の秋から冬にかけてのり面全面にアンカー再設置の対策工事が行なわれた後ののり面（図-5.8）である。3 時期目ののり面を計測した際の条件について述べる。本のり面の3 時期目は 2019 年 7 月 10 日に計測を行なった。3 時期目の計測は 1, 2 時期目の計測同様に同一の MMS 計測にて点群を取得した。MMS の走行速度や走行車線も同一である。

3 時期目の計測時点でのり面に施されている対策工について説明する。変化が加えられた箇所は合計 4 つであり、これらの 2 時期比較を行なう（図-5.9）。変化が加えられた箇所、1 つ目はのり枠の補修である（図-5.10）。2 時期目以前ののり面ではのり枠のコンクリートが剥落している箇所が存在していた。対策工事によって剥落していた箇所のコンクリートは修復された。2 つ目はのり枠交点のアンカーキャップ撤去である（図-5.11）。1, 2 時期目まではのり枠交点に金属製のアンカーキャップが設置されていたが、対策工事により撤去された。3 つ目はのり面全面に対するのり枠内アンカーの新設である（図-5.12）。のり面全面に対しアンカーが新設されたが、図の通り起点側のり面のみを解析の対象とする。4 つ目は縦排水管の設置箇所変更である（図-5.13）。これら 4 か所を対象に解析を行なう。解析を行なう際にはフィルタリング前後、変状の上限下限設定の有無で分け行なう。

まずはのり枠補修部の解析結果について述べる（図-5.14）。フィルタリングの前後を問わず、アンカー新設の箇所をのり面前面へ変化する変状としてとらえることができている。図内の縦ののり枠の補修部も同様の変状としてとらえられている。そして、1 時期目に存在していた保護網を支える器具が撤去された変化も図内左上の変状として表れている。続いてのり枠交点のアンカーキャップ撤去部の解析結果について述べる（図-5.15）。上限設定を行なわずに解析した結果、アンカー新設、キャップ撤去の様子が変状としてそれぞれとらえられている。上限設定を行なった場合、それぞれの変化をより詳細に見ることができる。また  $\pm 0.3$  m の変状設定では見られない変状も  $\pm 0.5$  m の変状設定にすることでそれぞれの変状をとらえることができている。またフィルタリングの有無によって、図内上部の電線の点群が存在しているが、アンカーキャップの変化抽出には影響を及ぼしていない。続いてのり枠内アンカー新設部の解析結果について述べる（図-5.16, 図-5.17）。のり枠全面に設置されたアンカーはどの解析結果においてものり面前面に変動する変状としてとらえられている。フィルタリング前後どちらにおいても植生の影響、植生を除去した影響により一部の変状が抽出できていない箇所が存在する。また図内左下ののり枠ではのり枠内全面が前面に変化した変状を表しているが、これは新たにコンクリートを打設した影響である。この変化も抽出できている。最後に縦排水管の変更部の解析結果について述べる（図-5.18, 図-5.19）。縦排水管を新たに設置した箇所がのり面前面に、縦排水管が撤去された箇所がのり面後方に変化する変状がとらえられている。補修を行なう前の 1 時期目の点群、補修を行った後の 3 時期目の点群の両方で変化の様子を確認できる分解能があり、変化の様子を明確に抽出することができた。

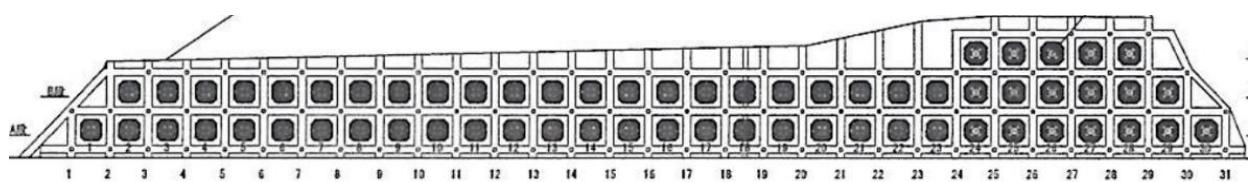


図-5.8 全面にアンカーを設置した3時期目ののり面

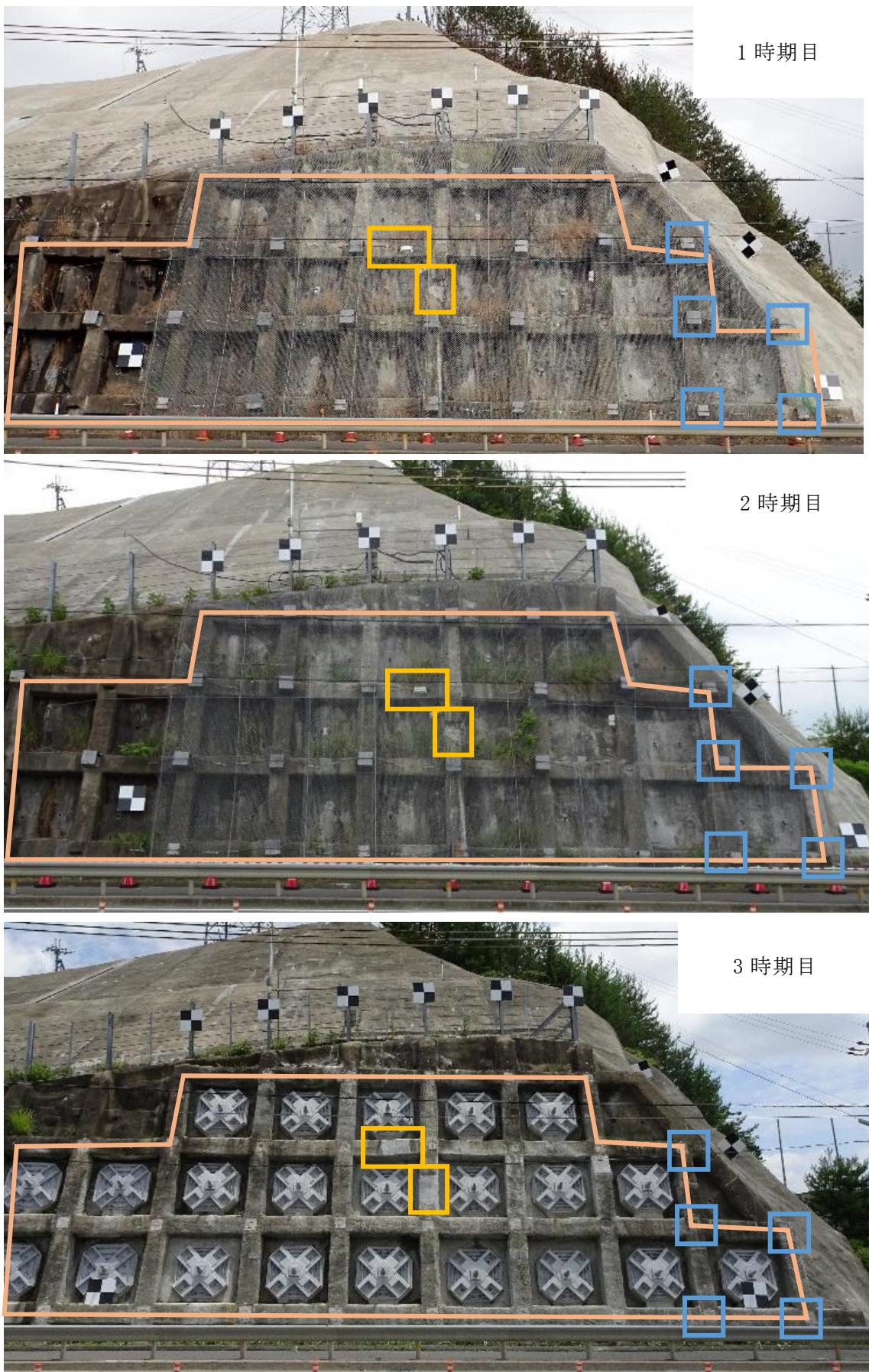
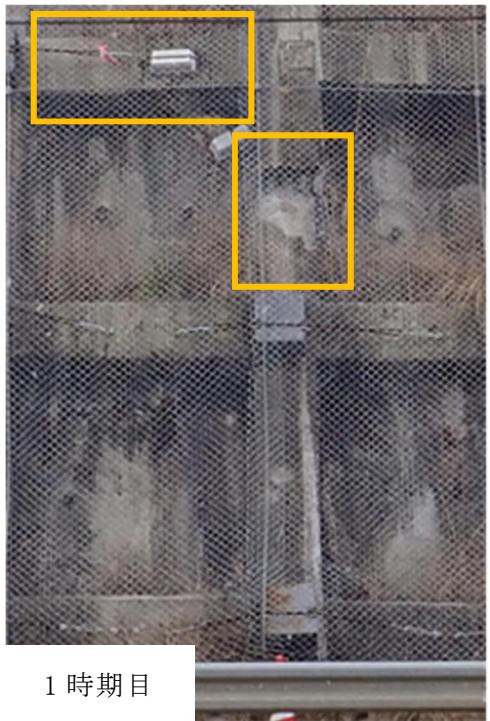


図-5.9 3 時期間ののり面変化の様子



1 時期目



3 時期目

図-5.10 のり枠補修部の1時期目から3時期目への変化

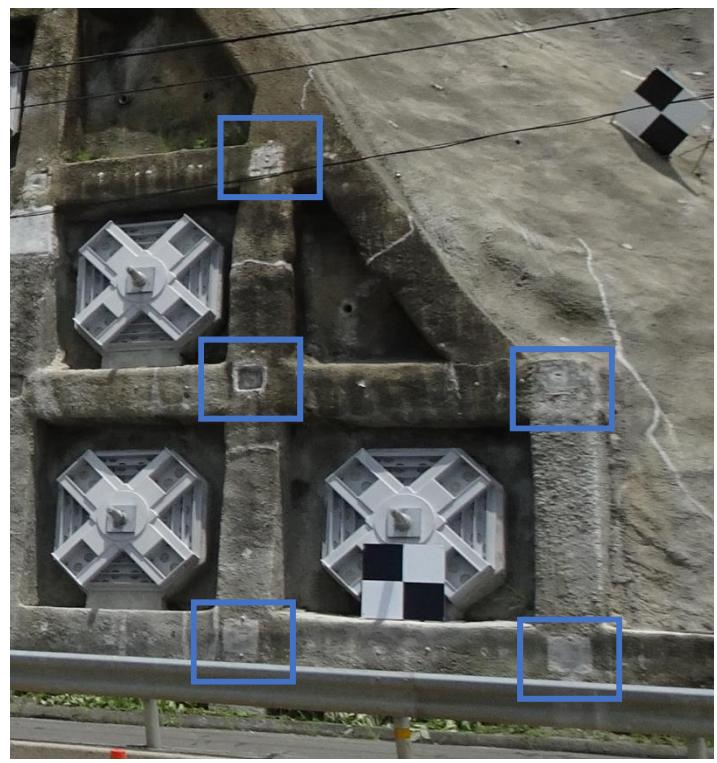
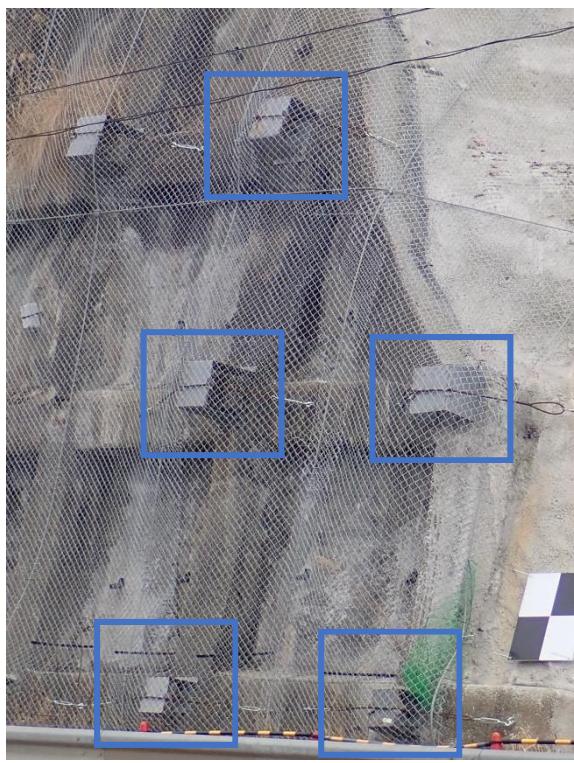


図-5.11 のり枠交点のアンカーキャップ撤去部の1時期目から3時期目への変化



図-5.12 のり枠内アンカー新設部の1時期目から3時期目への変化

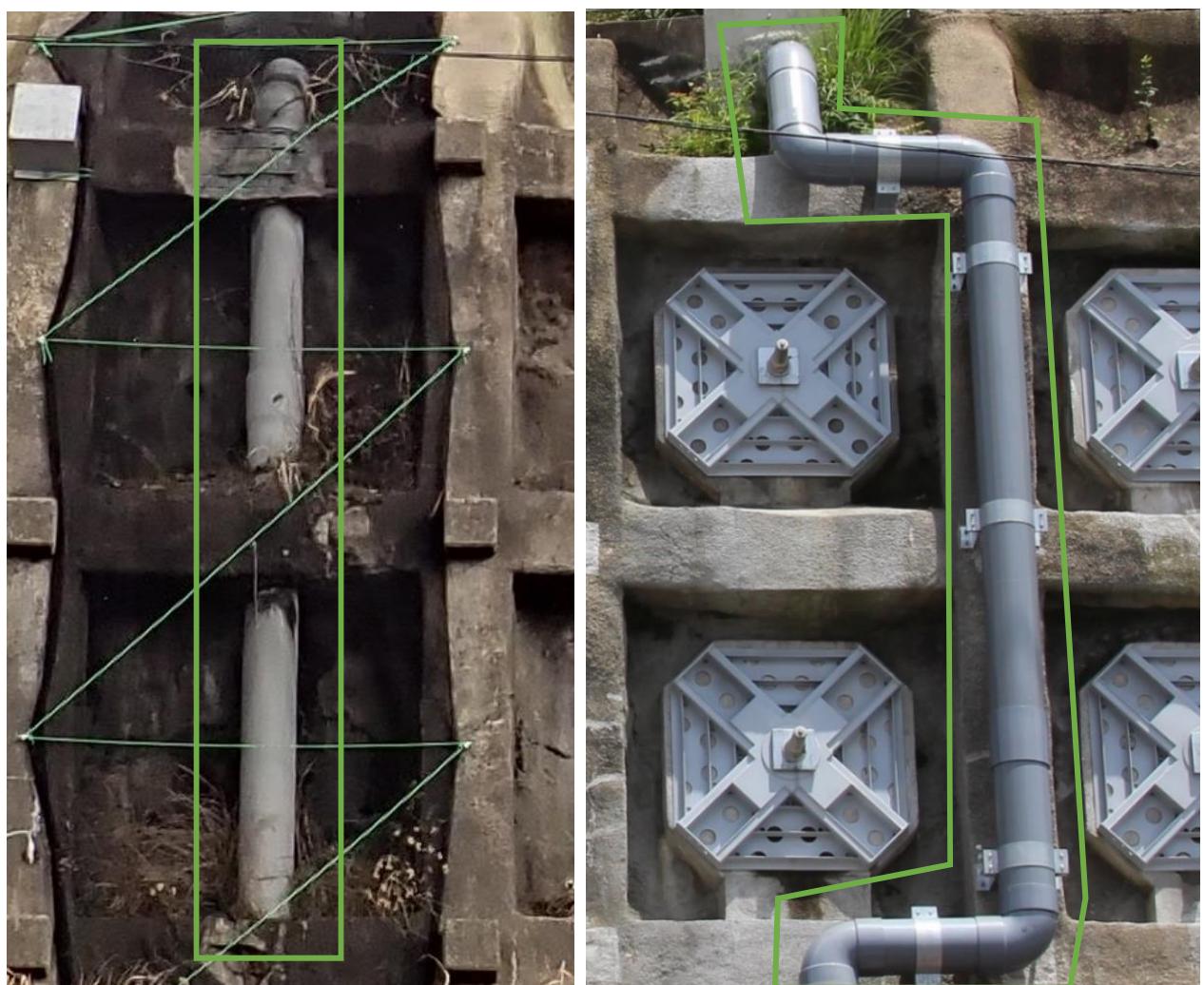


図-5.13 縦排水管変更部の1時期目から3時期目への変化

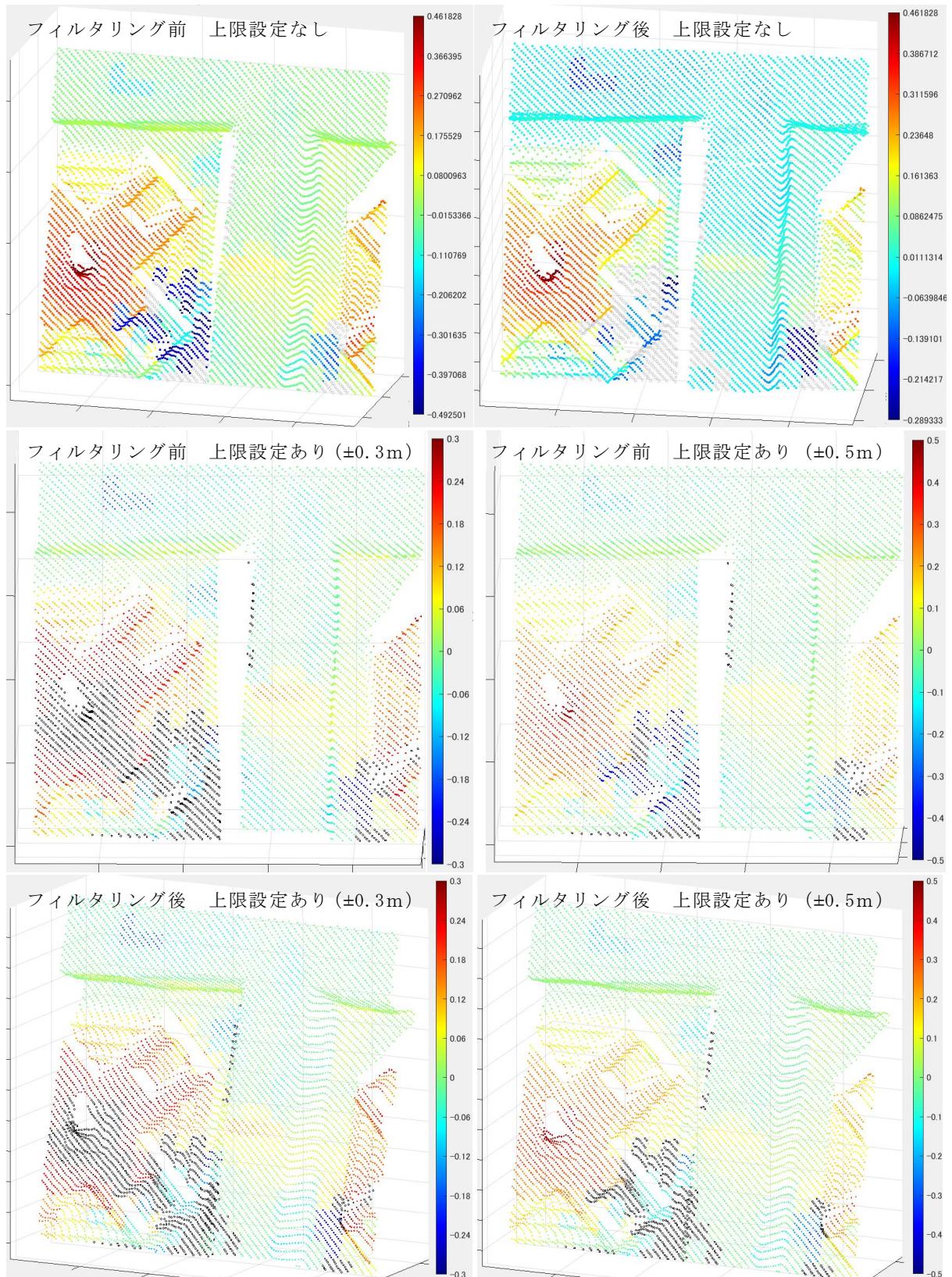


図-5.14 のり枠補修部の解析結果（単位はm）。フィルタリング前後と上限下限の変更を行なっている。上限は $\pm 0.3$  m,  $\pm 0.5$  mの設定で2回行なっている。

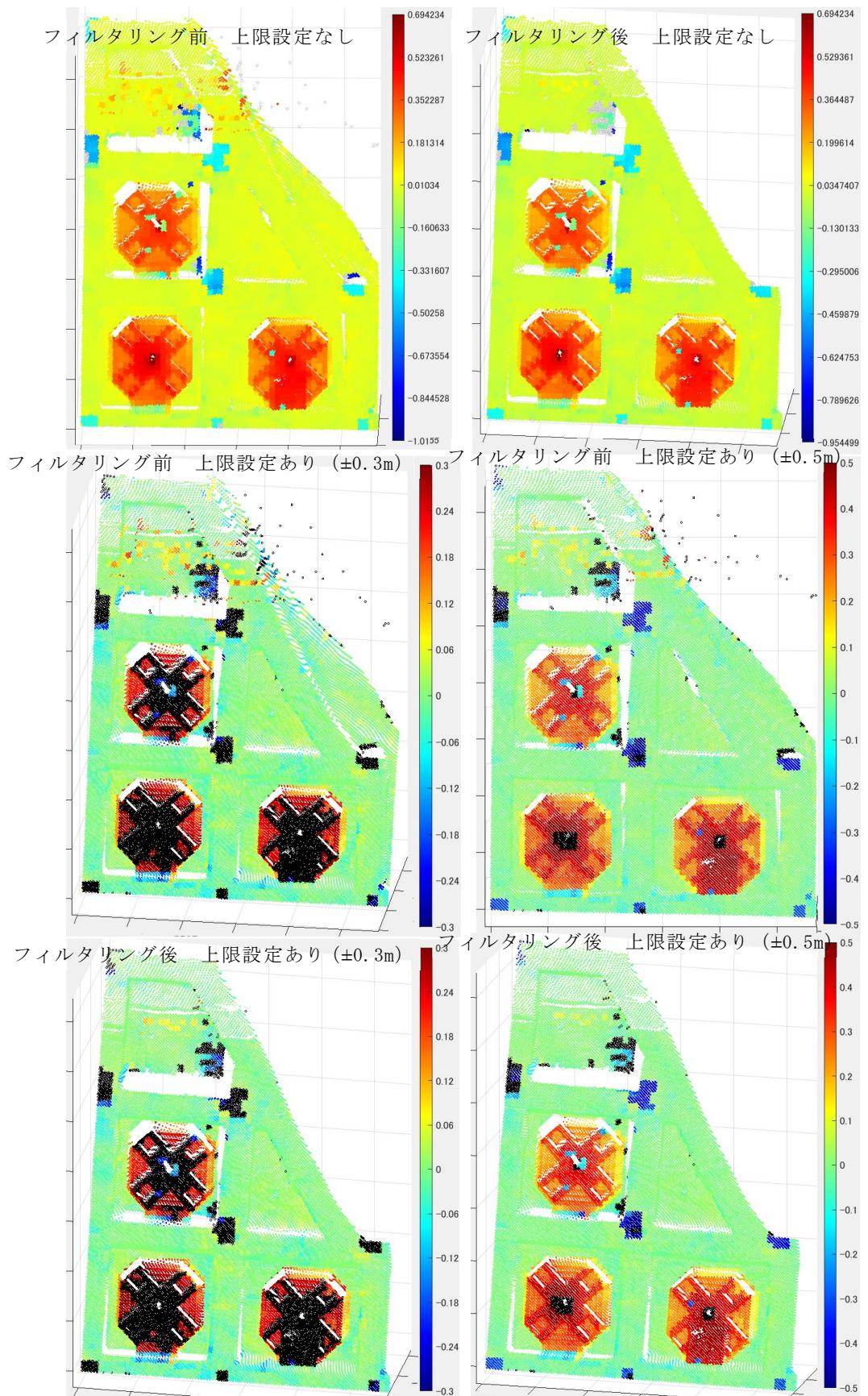


図-5.15 のり枠交点のアンカーキャップ撤去部の解析結果（単位は m）。フィルタリング前後と上限下限の変更を行なっている。上限は  $\pm 0.3$  m,  $\pm 0.5$  m の設定で 2 回行なっている。

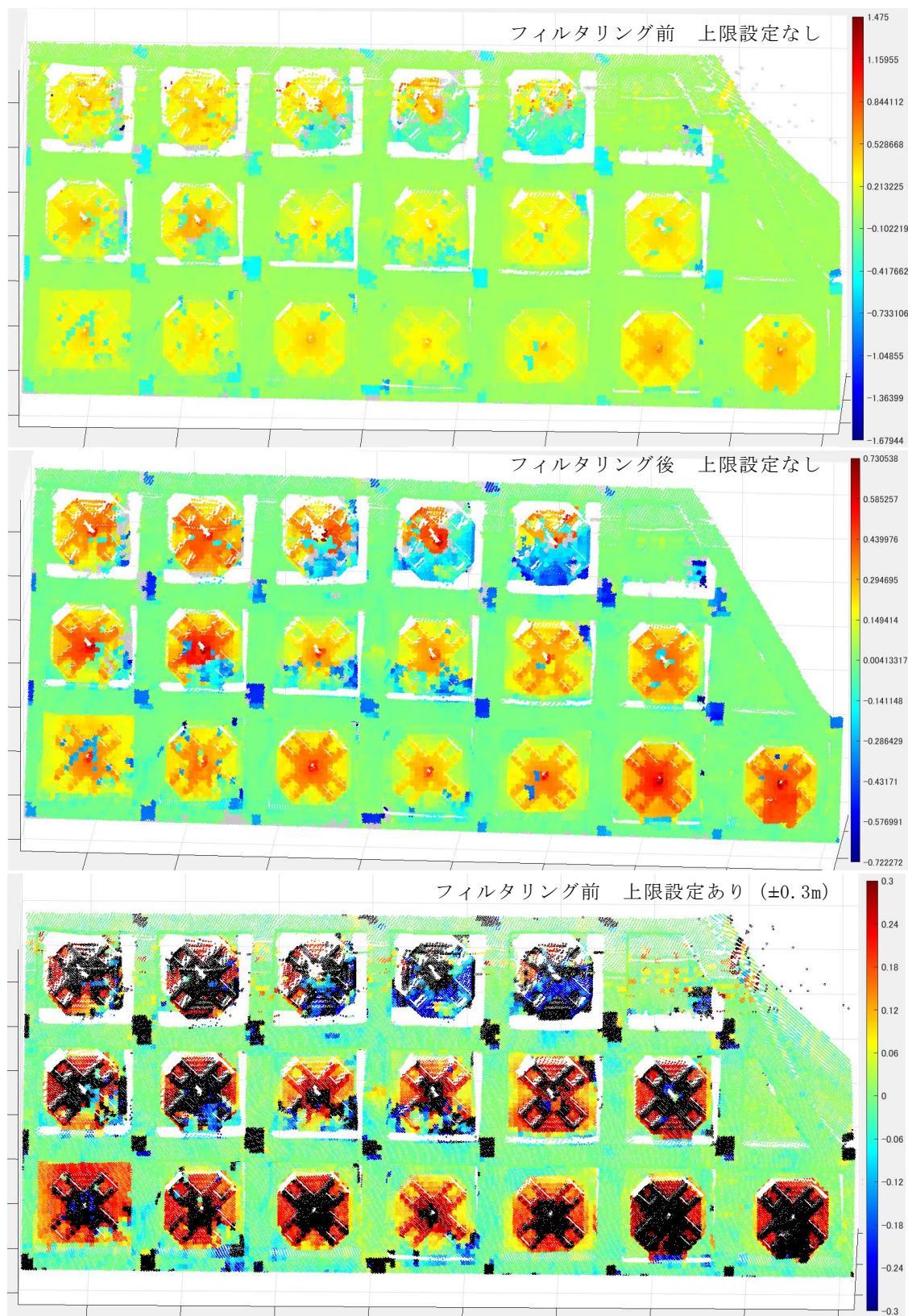


図-5.16 のり枠内アンカー新設部の解析結果（単位はm）。フィルタリング前後と上限下限の変更を行なっている。上限は $\pm 0.3$  m,  $\pm 0.5$  mの設定で2回行なっている。

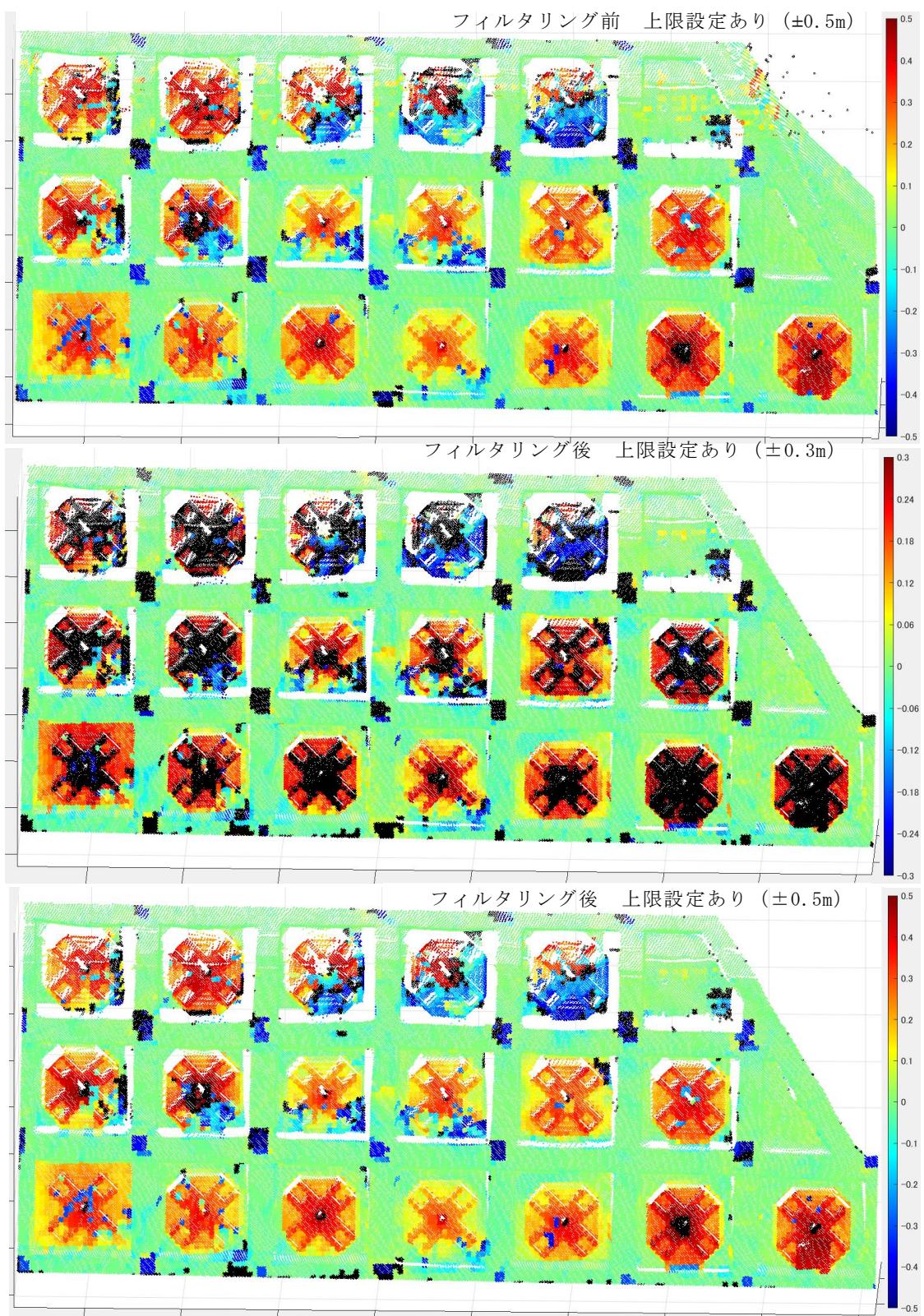


図-5.17 のり枠内アンカー新設部の解析結果（単位はm）。フィルタリング前後と上限下限の変更を行なっている。上限は $\pm 0.3$  m,  $\pm 0.5$  mの設定で2回行なっている。

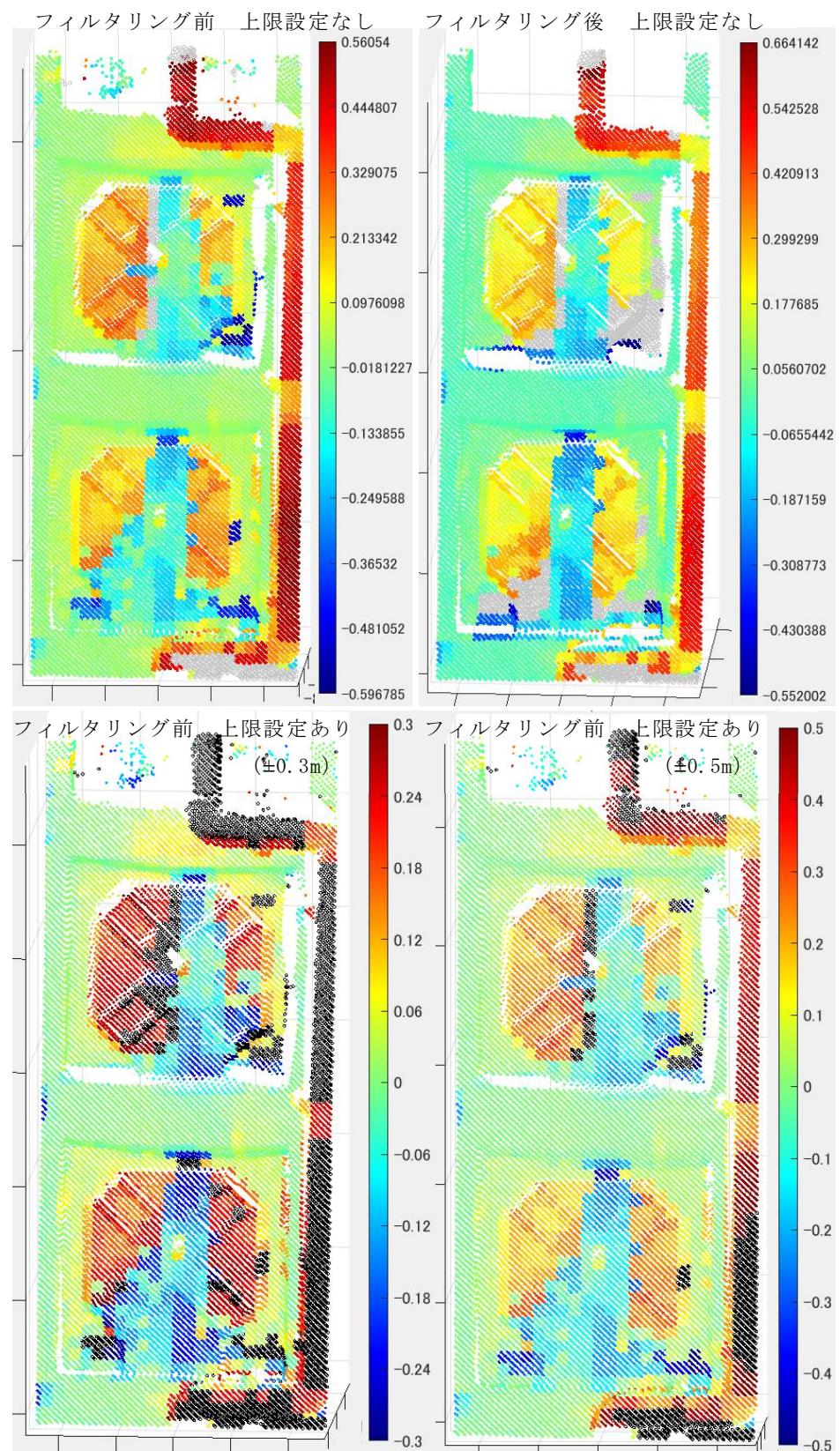


図-5.18 縦排水管の変更部の解析結果（単位はm）。フィルタリング前後と上限下限の変更を行なっている。上限は±0.3 m, ±0.5 mの設定で2回行なっている。

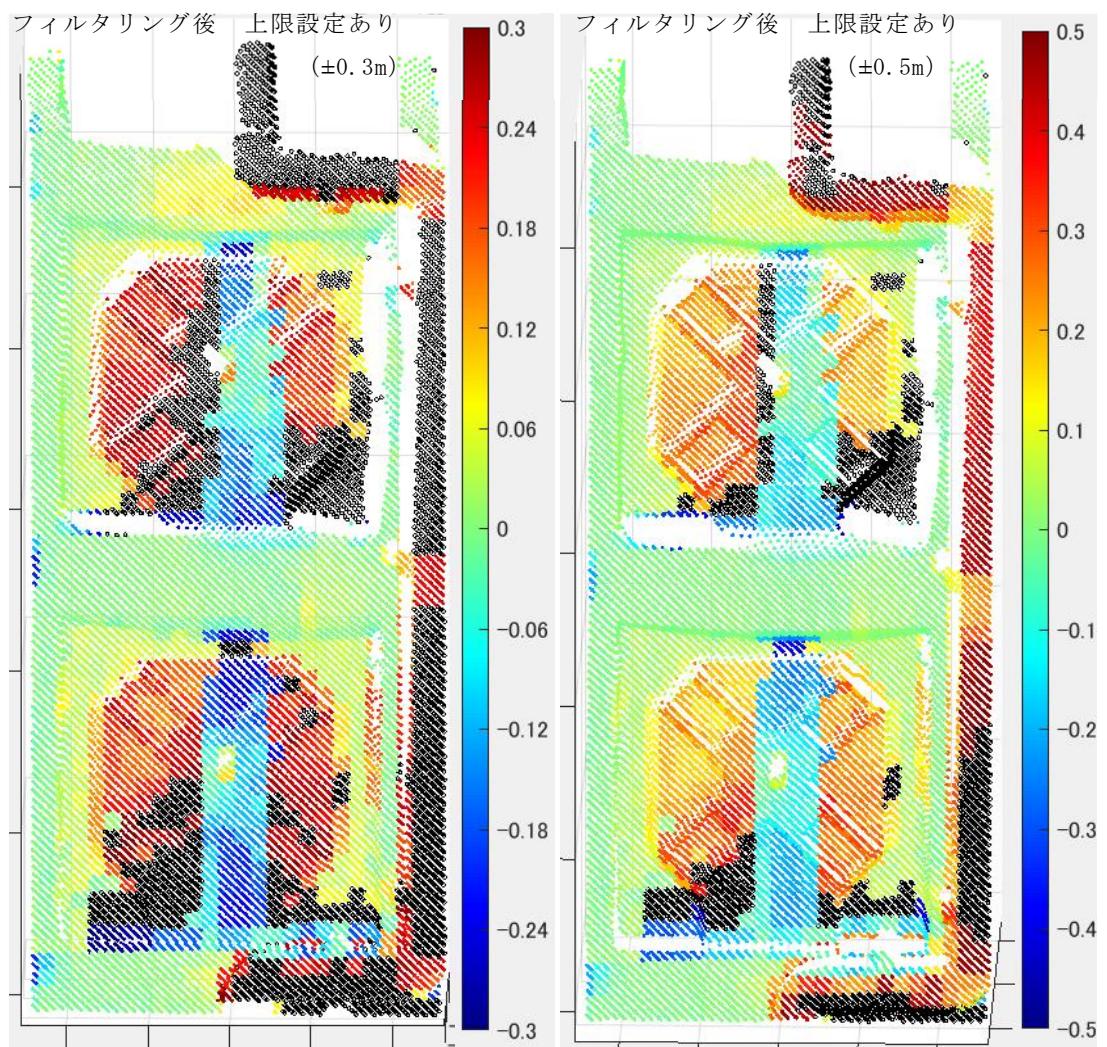


図-5.19 縦排水管の変更部の解析結果（単位はm）。フィルタリング前後と上限下限の変更を行なっている。上限は $\pm 0.3$  m,  $\pm 0.5$  mの設定で2回行なっている。

## 5.3 点群密度の異なるレーザスキャナを用いた道路周辺の変状

本節では、MMS と ICP を利用した手法で道路周辺の地物変化を抽出できるか検証した実験について述べる。現在、国土交通省では国土交通データプラットフォーム（仮称）構想によってインフラデータプラットフォームの構築が進められており、平成 30 年度より車載写真レーザ測量（MMS）を用いて三次元点群データを収集している<sup>15)</sup>。国土交通省が保有する多くのデータと民間のデータを連携し、フィジカル空間の事象をサイバー空間に再現することで様々な利活用としての活躍に期待できる。その利活用案の 1 つとしてこのプラットフォームを用いることで地物変化を効率的に収集でき、点検の補助、スクリーニング手法としての活用が期待できる。本章では、このプラットフォームに則り、すでに取得されている点群と今回取得した新たな点群で比較し、地物変化を抽出できるかを検証し、点検の補助として活用できるか考察を行なう。

### （1）検証概要

検証の対象としたのは静岡市内の道路周辺である。すでに取得されていた点群を 1 時期目、新たに取得した点群を 2 時期目とした。また地物変化の参考として 2 時期目の一か所に高さの異なる段ボールを 3 つ設置した（図-5.20）。それぞれ 0.10 m, 0.17 m, 0.36 m の高さである。

続いて、点群の取得方法について説明する。点群は 1 時期目に MMS、2 時期目に自動運転システムを用いて取得した。それぞれの取得方法の使用は表-7.1 のとおりである。異なるレーザスキャナを使用しているため、点群の分布状況も異なっている（図-5.21）。また 1 時期目は座標を持った点群、2 時期目は座標を持たない点群を取得した。時速 40 km から 50 km で渋滞していない道路を走行した。点群を取得した際は上下線 1 回ずつ計測を行なった（図-5.22）。

続いて、取得した点群の解析に至るまでの処理について説明する。既述の通り、CloudCompare というソフトウェアを用い、点群処理を行なった。まず 2 時期目は座標を持たない点群であるため、5 つの標定点を用いて 1 時期目の点群に重ね合わせを行なった。その後、段ボールと歩道、車道の範囲で点群を切り出し、標識や車両、植生などの点群を排除するフィルタリングを行なった。その後、1、2 時期間で取得した道路表面の点群におおきなずれが見られるため、CloudCompare 内の ICP 機能で 2 時期目の点群の位置・姿勢を 1 時期目の点群に合わせる形で補正した。これらの点群を解析に用いる点群とした（図-5.23、図-5.24）。フィルタリングを行なっていない点群同士、行なった点群同士でそれぞれの時期で解析を行なう。その点群を図-5.25、図-5.26 に表示する。



図-5.20：道路周辺に設置した段ボールの様子、段ボールの大きさ（縦×横×高さ）  
(一番手前の段ボール1 :  $0.30 \times 0.20 \times 0.10$ , 真ん中の段ボール2 :  $0.33 \times 0.27 \times 0.17$ ,  
一番奥の段ボール3 :  $0.36 \times 0.33 \times 0.36$ ), 単位はm

表- 7.1 本検証で用いた点群取得機器の仕様

	1 時期目	2 時期目
点群取得方法	三菱 : MMS-G220	自動運転システム
レーザスキャナ	Sick : LiDAR センサ LM5xx	Velodyne Lidar-16
精度	25 mm±50 mm	25 mm±30 mm

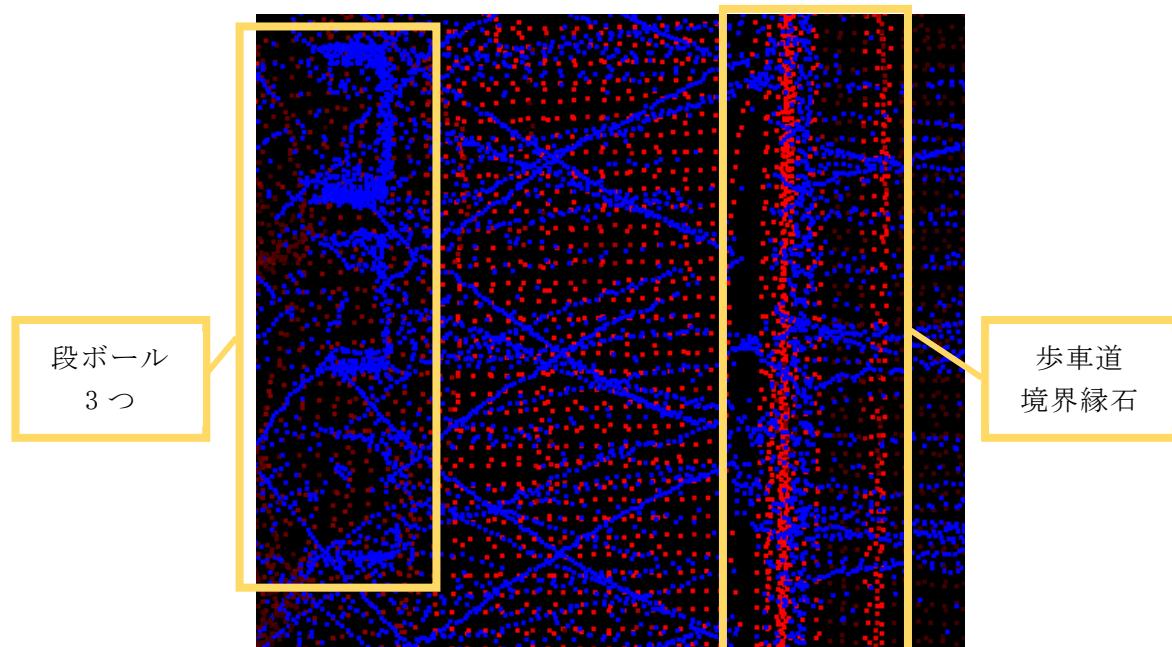


図-5.21 使用したレーザスキャナの点群分布の違い（1 時期目：赤、2 時期目：青）



図-5.22 1 時期目の点群を取得した静岡の道路（取得した道路の点群は全長 4 km）

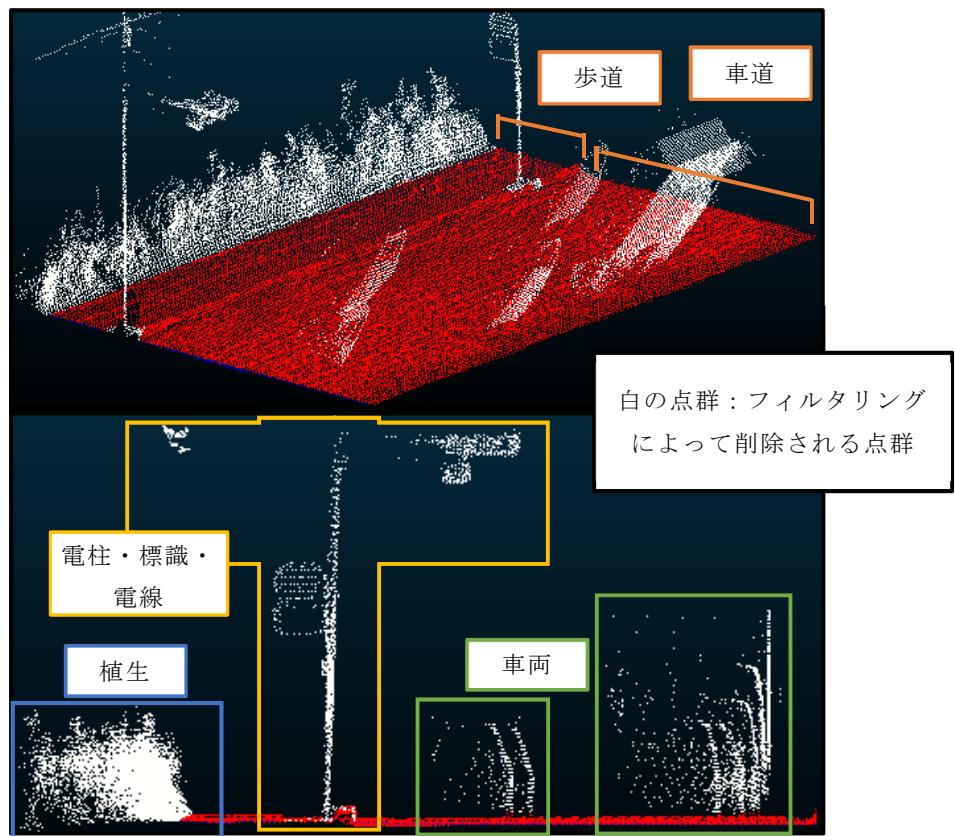


図-5.23 MMS 計測により取得した 1 時期目の点群

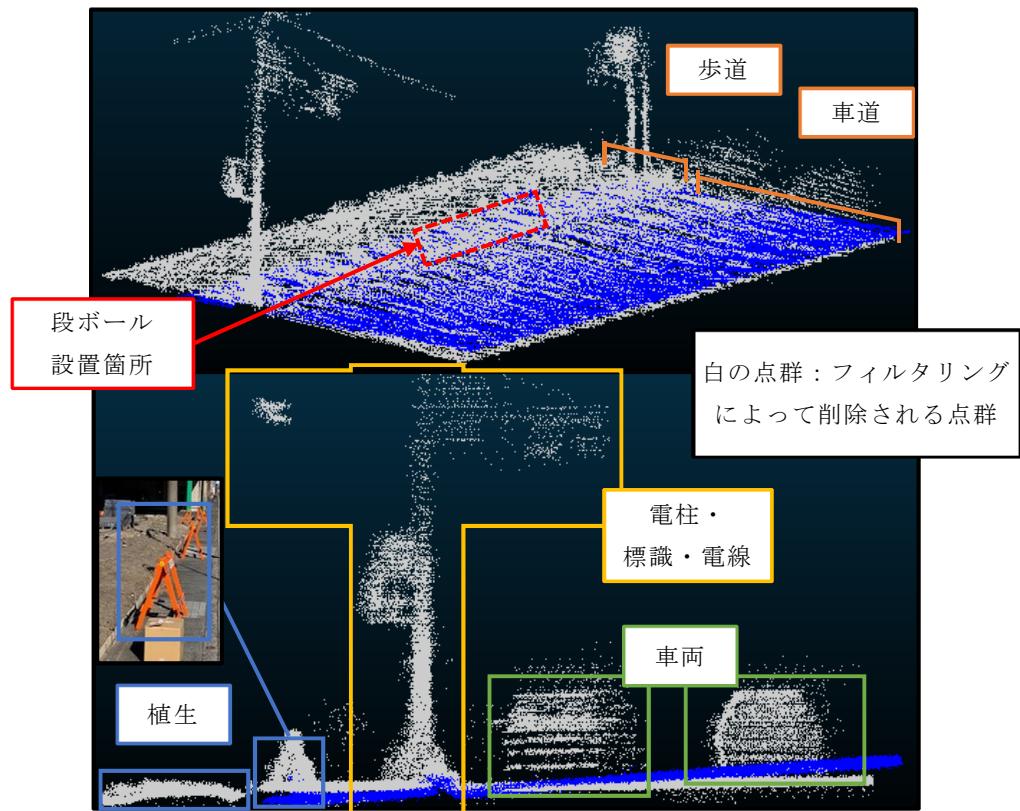


図-5.24 自動走行による計測により取得した 2 時期目の点群

青の点群は 1 時期目の点群に合わせて位置補正を行なったため、地表面のずれが生じている

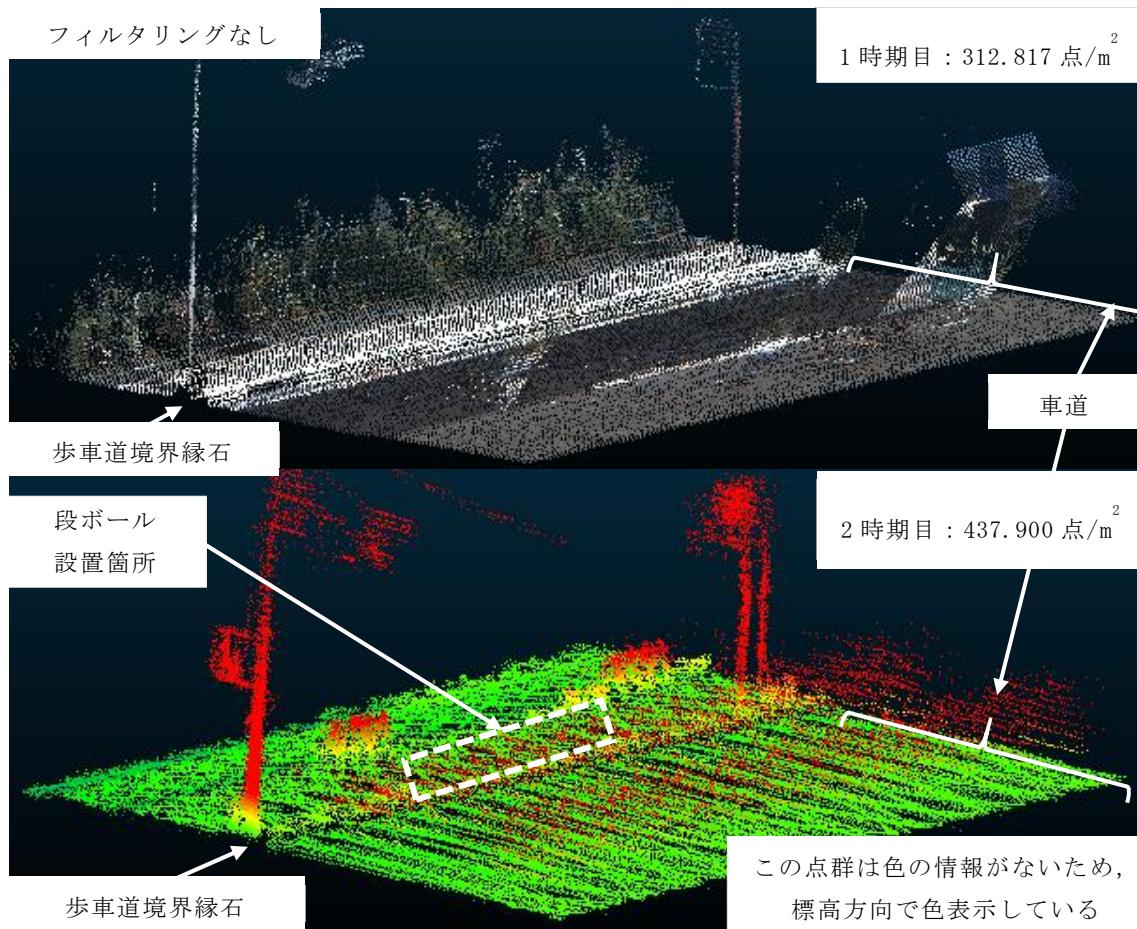


図-5.25 フィルタリングを行なう前の2期間の点群の様子

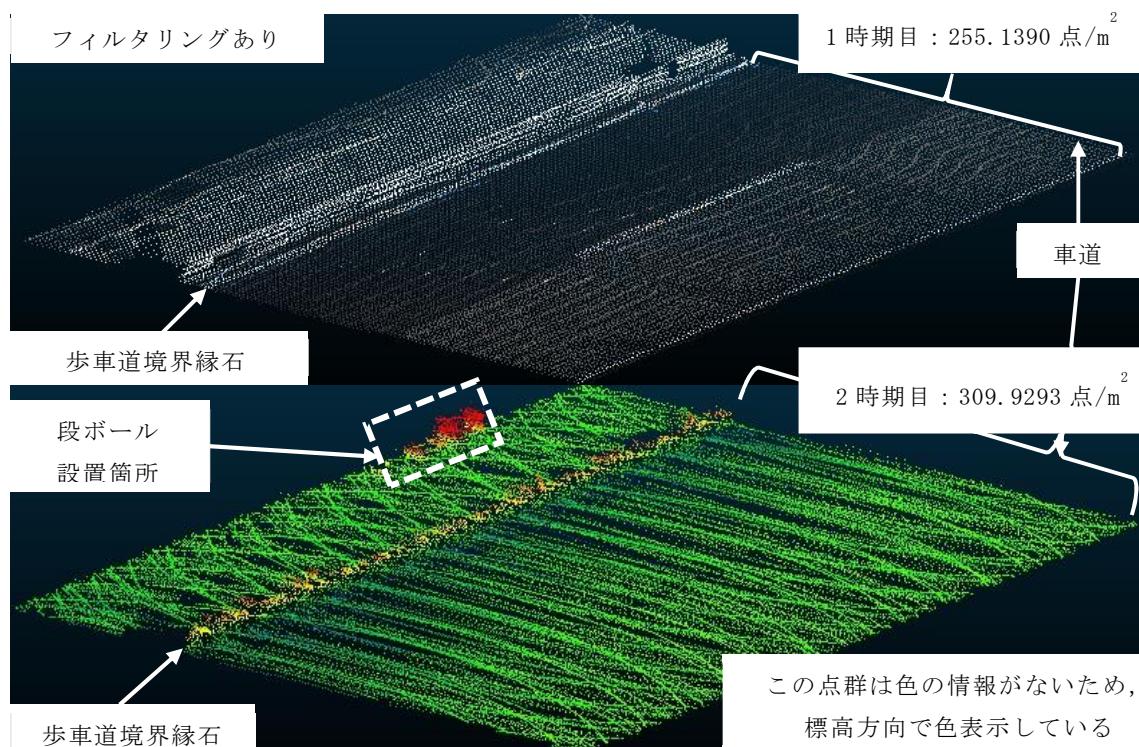


図-5.26 フィルタリングを行なった後の2期間の点群の様子

## (2) 検証結果

解析の結果について述べる。解析は段ボール設置箇所を中心として、地表面を 0.2 m のメッシュで区切り、上限を 0.5 m、下限を -0.1 m に設定し、そのメッシュ内で高さ方向にどれだけ変化したかを求める。解析はフィルタリングの前後と解析範囲を変更することで合計 6 回行なった。

まずはフィルタリング後の段ボール周辺の範囲の変状抽出を行なった（図-5.27、図-5.28、図-5.29）。図-5.29 の上部に段ボール 3 つの変化の様子を確認することができる。点群から段ボールの箇所を確認することができるが、変状の位置と段ボールの形状が一致していない。これは段ボール上面の点群が十分に取得できていないこととメッシュサイズを 0.2 m で解析を行なったことが原因であると考えられる。続いて、フィルタリング後の段ボール周辺の歩道の範囲を対象に変状抽出を行なった（図-5.30、図-5.31、図-5.32）。先ほどの解析と続き、段ボールの高低に合わせて、変状抽出の結果も変化量が異なって表されている。フィルタリング後の段ボールと車道を含む範囲で解析を行なった（図-5.33、図-5.34、図-5.35）。段ボールの 3 箇所はすべて変状として抽出できている。続いて、フィルタリング前の段ボール周辺の範囲の解析について述べる（図-5.36、図-5.37、図-5.38）。段ボール設置箇所付近に段ボールの変状と段ボール後方の植生の影響により、それ以外の変状が表れている。続いて、フィルタリング前の段ボール周辺の歩道の範囲を解析した（図-5.39、図-5.40、図-5.41）。最後にフィルタリング前の段ボールと車道を含む範囲の解析を行なった（図-5.42、図-5.43、図-5.44）。ノイズなどの影響が変状として表れているが、段ボールの箇所は変状として抽出できている。

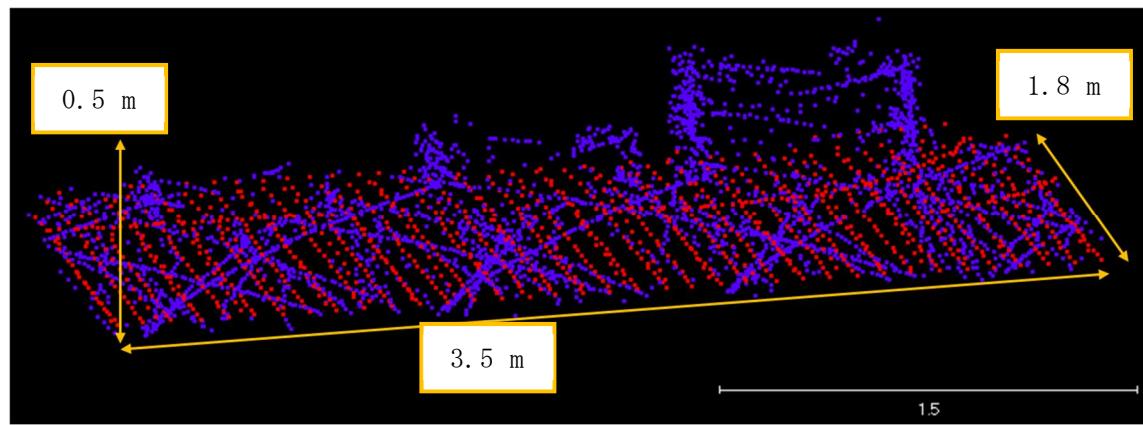


図-5.27 フィルタリング後の段ボール周辺の範囲. 赤の点群：1 時期目, 青の点群：2 時期目

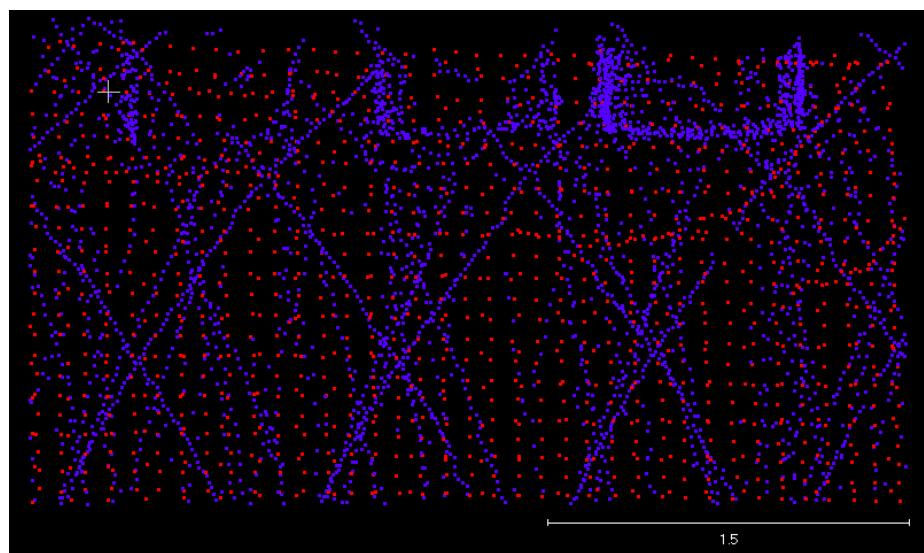


図-5.28 フィルタリング後の段ボール周辺の範囲. 上から見た様子.  
赤の点群：1 時期目, 青の点群：2 時期目

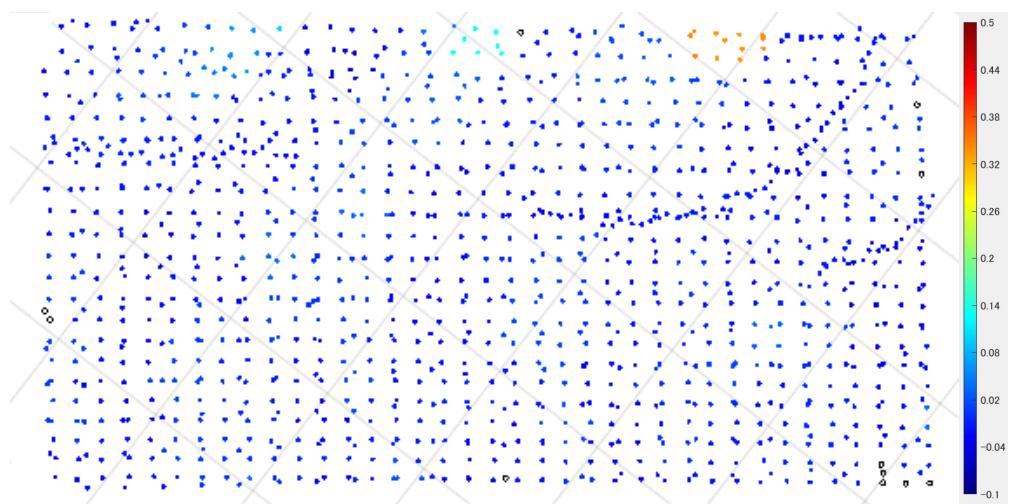


図-5.29 フィルタリング後の段ボール周辺の範囲の解析結果（単位は m）

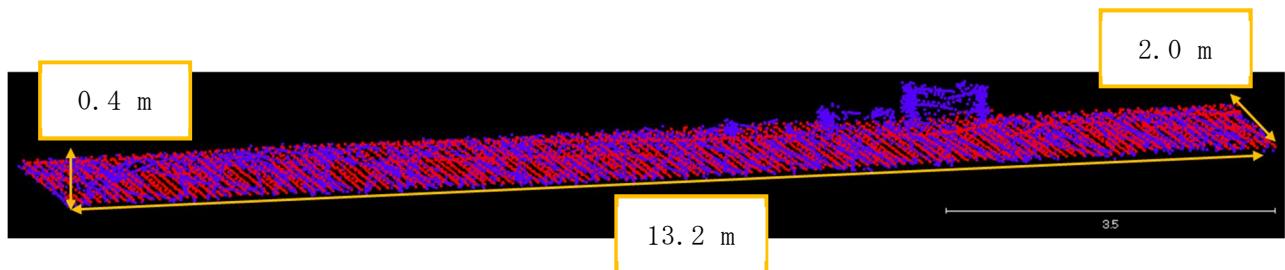


図-5.30 フィルタリング後の段ボール周辺の歩道の範囲.  
赤の点群：1 時期目，青の点群：2 時期目

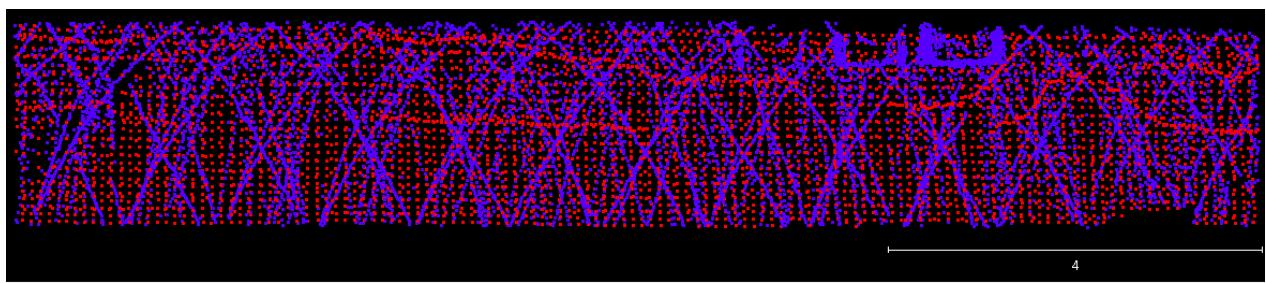


図-5.31 フィルタリング後の段ボール周辺の歩道の範囲. 上から見た様子.  
赤の点群：1 時期目，青の点群：2 時期目

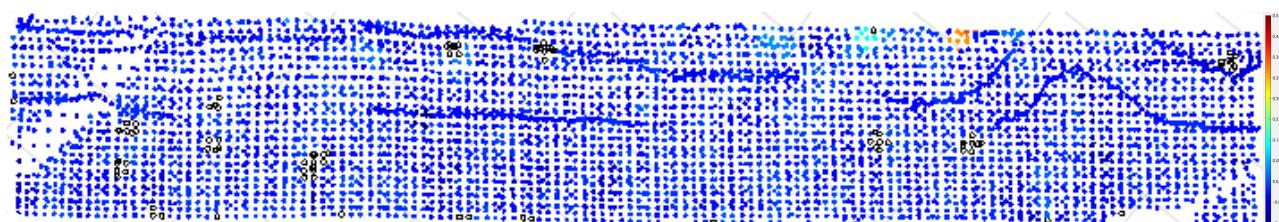


図-5.32 フィルタリング後の段ボール周辺の歩道の範囲の解析結果（単位は m）

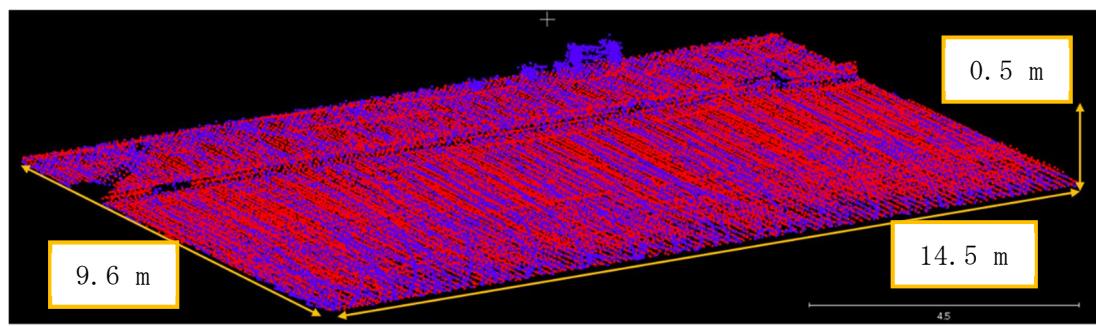


図-5.33 フィルタリング後の段ボールと車道を含む範囲.  
赤の点群：1 時期目，青の点群：2 時期目

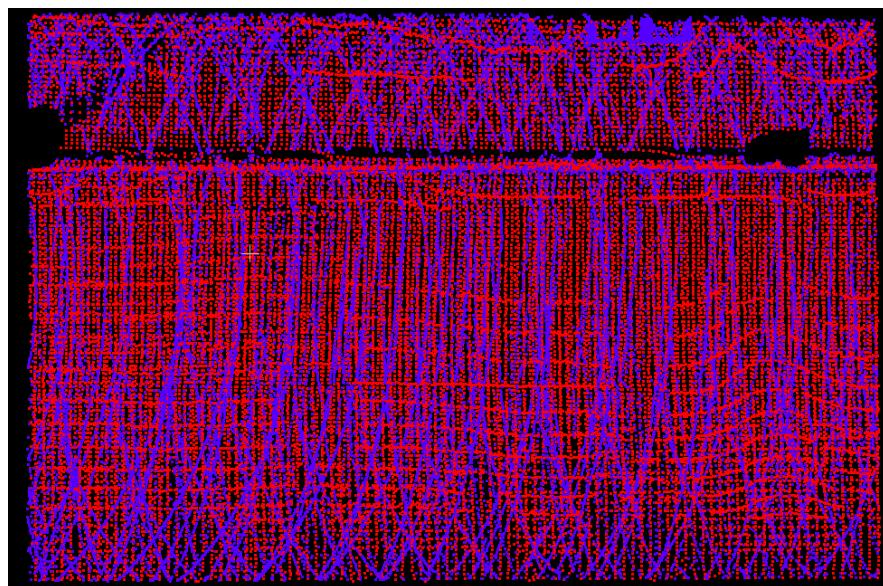


図-5.34 フィルタリング後の段ボールと車道を含む範囲. 上から見た様子.  
赤の点群：1 時期目，青の点群：2 時期目

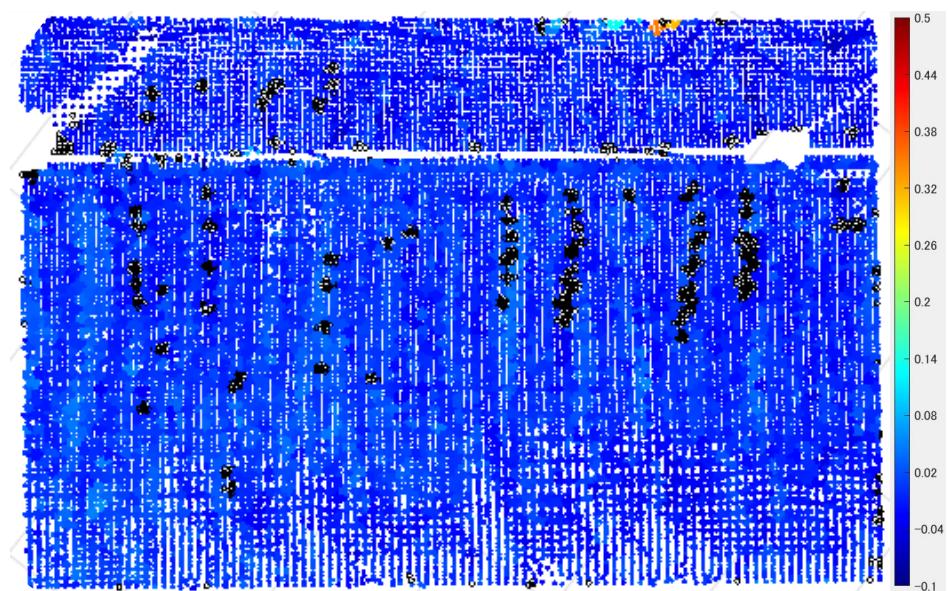


図-5.35 フィルタリング後の段ボールと車道を含む範囲の解析結果（単位は m）

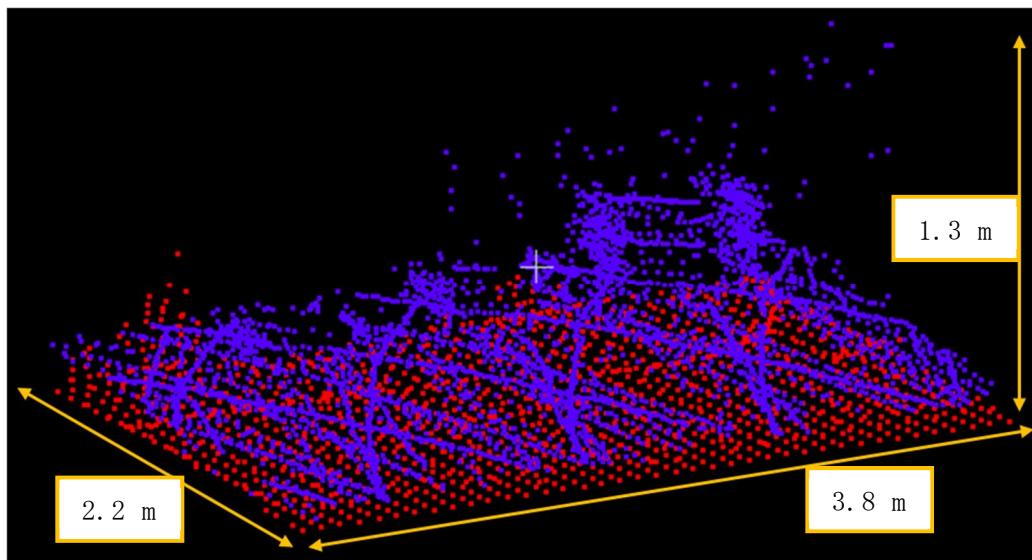


図-5.36 フィルタリング前の段ボール周辺の範囲. 赤の点群：1 時期目, 青の点群：2 時期目

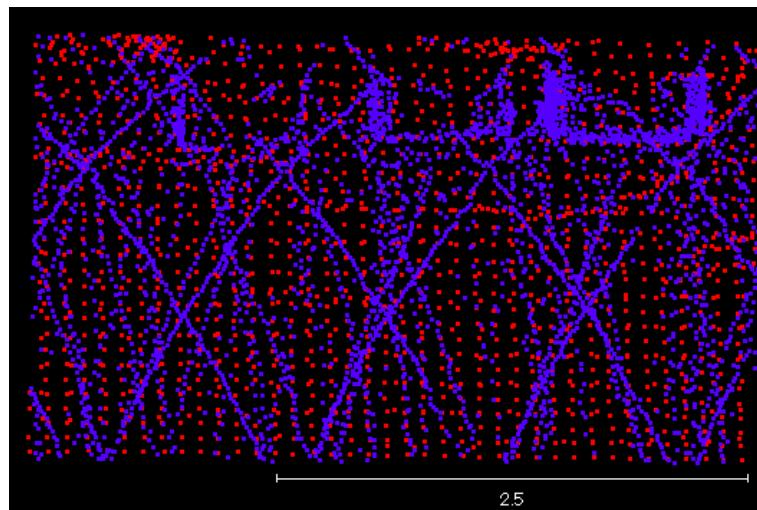


図-5.37 フィルタリング前の段ボール周辺の範囲. 上から見た図.  
赤の点群：1 時期目, 青の点群：2 時期目

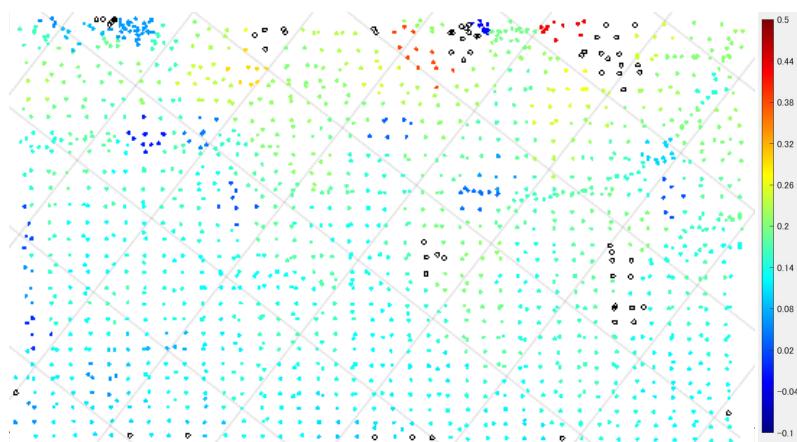


図-5.38 フィルタリング前の段ボール周辺の範囲の解析結果（単位は m）

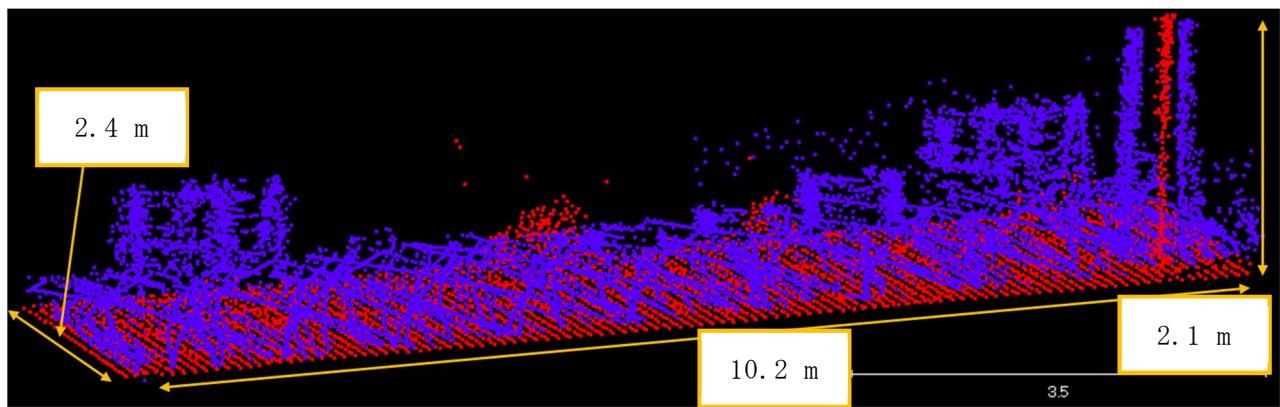


図-5.39 フィルタリング前の段ボール周辺の歩道の範囲。  
赤の点群：1 時期目，青の点群：2 時期目

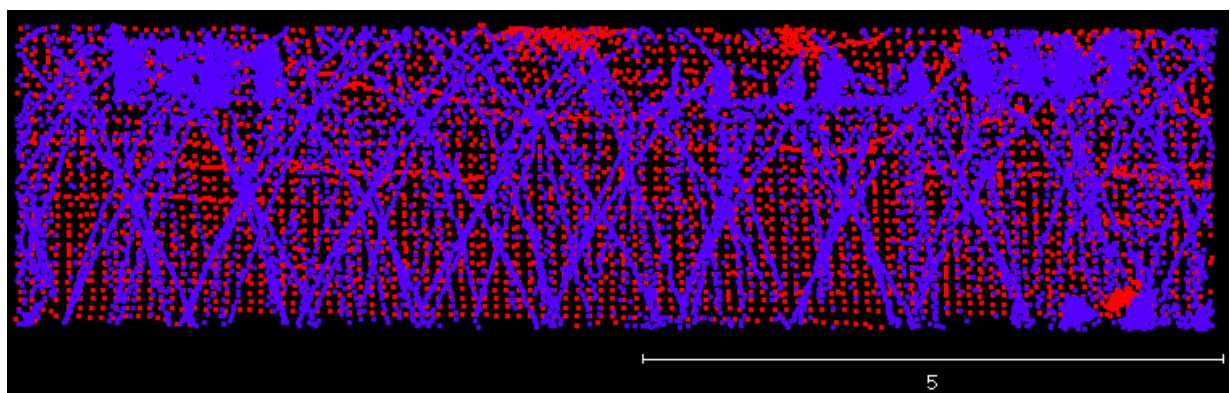


図-5.40 フィルタリング前の段ボール周辺の歩道の範囲. 上から見た図。  
赤の点群：1 時期目，青の点群：2 時期目

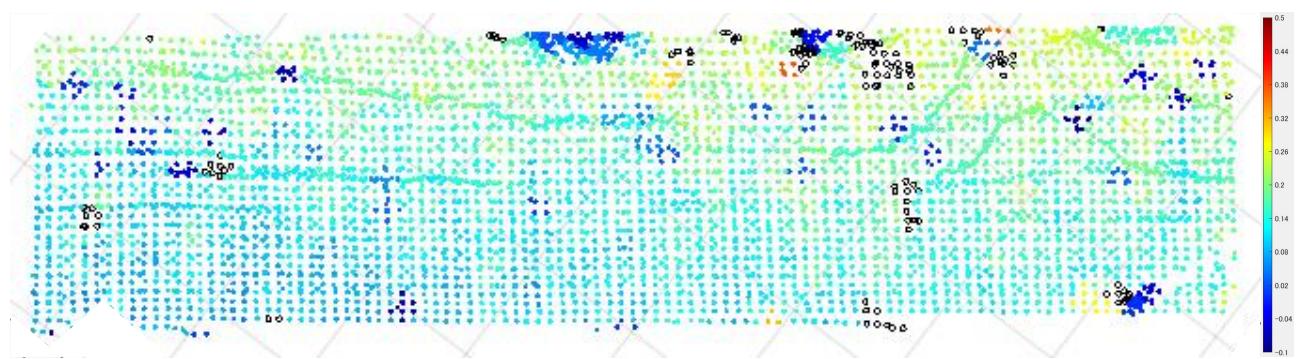


図-5.41 フィルタリング前の段ボール周辺の歩道の範囲の解析結果（単位は m）

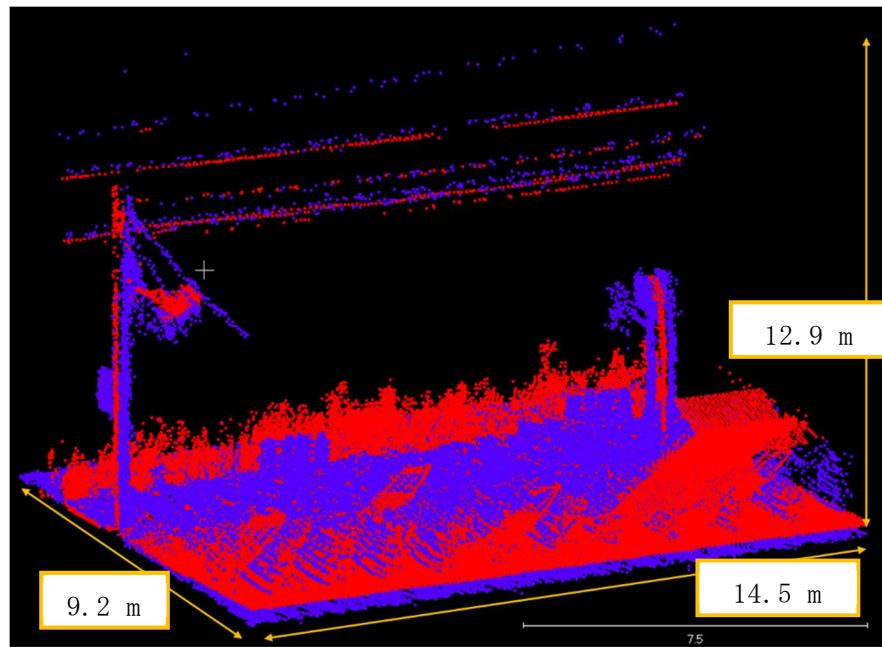


図-5.42 フィルタリング前の段ボールと車道を含む範囲の範囲  
赤の点群：1 時期目，青の点群：2 時期目

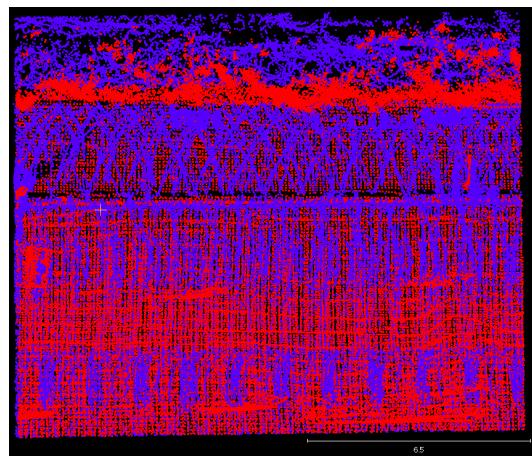


図-5.43 フィルタリング前の段ボールと車道を含む範囲の範囲を上から見た  
図

赤の点群：1 時期目，  
青の点群：2 時期目

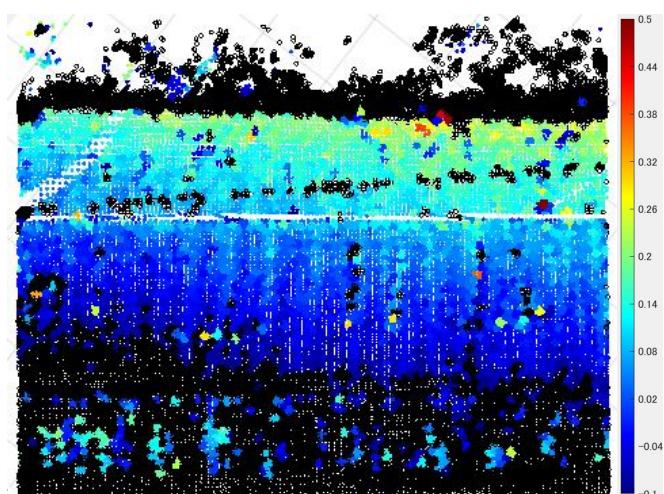


図-5.44 フィルタリング前の段ボール周辺と  
車道を含む範囲の解析結果（単位は m）

1時期目と2時期目で異なる手法により取得された点群で道路表面の地物変化の抽出を試みた。道路上には車両や電柱、標識、電線などの解析の妨げとなる多くの点群が存在していた。そのままの状態では解析により、地物変化を確認できなかつたが、フィルタリングを行なうことで、変化の様子を確認することができた。以上より異なる計測機器で点群を取得し、フィルタリングを施し、解析を行なうことで2時期間の地物変化を抽出できることが分かつた。本手法は道路周辺の点検のスクリーニング手法として活用が期待される。今後はこのプラットフォームを活用し、地物変化に応用する際は地物変化の見落としを少なくする必要がある。どの範囲で点群を取得するか、または何を対象として地物変化を抽出するかを検討していかなければならない。

## 5.4 MMSを使ったのり面の維持管理法実用化への検証

本節では、前節までの研究成果を基にのり面の維持管理法実用化に向けて検証した。

### (1) 検証概要

ICT 技術を建設現場に導入することによって、建設生産システム全体の生産性向上を図り、魅力ある建設現場を作るという i-Construction の取り組みが進められている。維持管理工程においても、3 次元データの活用による同様の効果が期待されているが、測量、設計および施工の建設プロセスにおける BIM/CIM による 3 次元モデルの活用ほどは普及していない。3 次元データを使った維持管理の事例として、「BIM/CIM 活用ガイドライン（案）第 5 編 道路編（令和 3 年国土交通省）」（以下、BIM/CIM ガイドライン）においては、「車載写真レーザ測量、レーザスキャナ（LS）等を用いて法面等を計測し、3 次元データ（初期値等）と比較することで、はらみ出し等の変状を面的に把握することができる。」と記載されている<sup>16)</sup>。

これまで地図情報レベル 500（以下、レベル 500）すなわち水平位置の標準偏差 250mm 以内および 標高点の標準偏差 250mm 以内の精度で数値地形図データを作成する仕様の MMS が、道路付属物管理業務あるいは道路台帳附図等の作成・更新用に用いられてきた<sup>16)</sup>。この MMS をインフラの維持管理に応用することは、近接目視等に拠ることなくインフラの健全性を点検・診断できる新技術の導入を推進する「第 5 次社会資本整備重点計画（令和 3 年国土交通省）」の目的にも合致する<sup>17)</sup>。その一方で、のり面のような道路インフラの維持管理に必要となる 3 次元点群の密度と精度は未検討のままであり、前述の BIM/CIM ガイドラインでも、対象物をどこまで詳細に表現するのかの測量精度や点群密度の仕様を意味するモデル詳細度は示されていない。対象物を高精度に測量するほど、より小さな変状が検出できる可能性があるが、必要となる労力やコストを考慮すると実施が困難になる状況にもなり得る。特にこれまで導入してきた MMS はインフラの維持管理への応用を目的にしておらず、測量機器としての性能は「移動計測車両による測量システムを用いる数値地形図データ作成マニュアル（案）」（平成 24 年国土交通省国土地理院、以下 MMS マニュアル）に基づいたレベル 500 を満たす詳細度の仕様が標準である<sup>18)</sup>。維持管理用として MMS の仕様を高度化することも可能であるが、前述のようにコスト高につながる課題が生じる。

また前述の BIM/CIM ガイドラインでは、取得されたレーザ点群から変状箇所を抽出するための手法が具体化されていない。例えば固定された標定点を設置して、それを基準にして 2 時期間「のレーザ点群の座標を比較することで変状箇所を特定する方法が考えられるが、標定点の設置作業に労力を要し、簡便に実施できる手法とはならない。このような背景を鑑み、レベル 500 仕様の MMS（以下、汎用 MMS）（図-5.45）による測量精度を定量的に明らかにし、当仕様の MMS をインフラの維持管理工程へ応用可能であることを検証した。



GNSS/IMU	三菱電機製 GPS: 1周波×2台 + 2周波×1台 IMU: ロール角, 0.72° ピッチ角0.36°, ヘディング0.18°
レーザスキャナ仕様	Sick社製LMS511: TOF方式 反射率10%検出距離: 40m 測距精度 (1σ) 6mm 最大パルスレート: 約2.71万点/s×2台 スキャンレート: 100Hz
自己位置精度 (GNSS可視時)	水平: 0.06m, 高さ: 0.15m 点群の位置補正精度 0.1m
測位方式	FKP

図-5.45 MMS に搭載されたレーザスキャナの仕様

## (2) 検証結果

MMS マニュアルでは、レベル 500 仕様では水平位置の標準偏差は 250mm 以内であり標高点の標準偏差も 250mm 以内での数値地形図データが要求されるが、第 3 章より良好な自己測位を保持することで、調整点を使った補正をすることなく、水平の標準偏差 120mm 以内および 標高の標準偏差 250mm 以内の地図情報レベル 250 以上の高精度測量が可能であることが示された (図-3.3, 図-3.5)。

前述の MMS マニュアルでは、レーザ点群を図化の基準とする場合、レベル 500 におけるレーザの点群密度は 400 点/m<sup>2</sup> 以上が要求される。それを考慮すると、第 3 章 3-2 より供用中の道路交通に支障を与えない 40km/h および 50km/h の走行速度で、要求される点群密度が確保されることが分かる (表-3.15)。なお上段と下段に対するレーザ照射距離の相違を考えると、レーザ照射距離は上段が約 15m、下段が約 12m であり、その相違は約 3m であるが (図-2.15)、上段のレーザ点群密度は下段より約 50% 近く変化するが (表-3.15)、下段の位置に相当する調整用基準点 TG-3, 5, 7 の測量精度は上段の検証点とあまり変わらない。これらのことより、走行速度やレーザ照射距離により点群密度はおおきく変化するが、それらは対象のり面における測量精度には影響しないことが分かる。ただし、車両とのり面との距離に対するレーザ点群密度を考慮すると、参考文献 19) に示されているように、点群密度は照射距離が大きく、また走行速度が大きくなるにつれ減少する<sup>19)</sup>。MMS の走行速度は、前述の通り共用中の道路を走行する際には、40km/h および 50km/h の速度で走行することから、15m 以上の照射距離ではレベル 500 に要求される点群密度を確保することが困難と考える<sup>19)</sup>。切土あるいは盛土のり面は、法高約 5m 程度ごとに小段を設けるので、本対象のり面のようないのり面の最下段の小段までが汎用 MMS の要求が満たされる範囲となる。これらのことから、汎用 MMS を使ったモニタリングものり面の最下段に適用するのが好ましいと考える<sup>20)</sup>。

本研究で得られた知見は、i-Construction 2.0 において推進されている、3 次元データ活用による維持管理の効率化に貢献することが期待される。特に、本研究で検証した汎用 MMS は、レベル 500 相当の精度でデータ取得ができるため、導入コストを抑えながら維持管理の効率化に貢献できると考えられる。また、MMS によるデータは、BIM/CIM モデルと連携させることで、より高度な維持管理が実現可能になり、データ連携による情報共有が円滑に行えるようになる。

## 第6章 結論

本研究は、インフラの経年による機能低下と労働力不足という二重の危機に直面する日本の高速道路網を背景に、従来の定性的かつ危険を伴うのり面点検の課題を克服することを目的とした。その解決策として、MMSで取得した3次元点群データにICPアルゴリズムを応用し、のり面の変状を定量的かつ安全に抽出する新手法の確立を目指し、MMSとICPに関する多角的な検証を通じてその実用性を明らかにした。

○本研究で得られた主要な知見について

### 第1章 序論の結論

本章では、日本の高速道路網が直面するインフラの機能低下と労働力不足という「二重の危機」を研究背景として提示した。従来の近接目視点検が持つ危険性や経済的損失、主観性といった構造的限界を指摘し、これらを克服する必要性を論じた。この課題に対して本研究は、モバイルマッピングシステム（以下「MMS」）で取得した3次元点群データにIterative Closest Point（以下「ICP」）アルゴリズムを応用することで、道路法面の変状を安全かつ定量的に抽出する新手法の確立を目的として設定した。本研究は国土交通省が推進するi-Constructionの理念に基づき、維持管理段階における3次元データ利活用を実務レベルで実装するものであり、データ駆動型の予防保全へ転換するための基盤技術としての学術的・社会的意義を持つことを明確にした。

### 第2章 研究概要の結論

本章では、研究の根幹をなす計測手法と解析手法の概要を述べた。計測には、広域の3次元点群データを効率的に取得可能なMMSと精度検証の基準となる座標（真値）を取得するためのトータルステーションを用いた。解析には、2つの異なる時期に取得した点群データの位置合わせを繰り返し計算によって行い、その差分から変位ベクトルを算出するICPアルゴリズムを応用した手法を採用した。研究対象として国道沿いの実在するのり面を選定し、調整用および検証用のターゲットを設置することで、以降の章で行う定量的評価の妥当性と信頼性を確保するための実験計画を確立した。

### 第3章 Mobile Mapping Systemに関する検証の結論

本章では、変状抽出の基礎となるMMSデータの精度と特性を多角的に検証し、以下の核心的知見を得た。

計測精度について、MMS車両の走行速度が40～50km/hの条件下で、点群データの二乗平均平方根（RMS）誤差は水平方向（ $\Delta XY$ ）で14～16mm、鉛直方向（ $\Delta Z$ ）で18～31mmに収まることを実証した。これにより実用上十分な精度を達成可能であることを明らかにした。また、衛星配置が良い（PDOP値が低い）条件下では計測誤差が低減されること、調整用基準点による補正が系統誤差の除去に有効であることを確認した。

点群密度と変状再現性について、走行速度が速い（50km/h）場合と遅い（40km/h）場合を比べて点群密度が約20%減少するものの、10mm程度のはらみ出しや20mm程度の亀裂といった微小な模擬変状を十分に識別できる再現性を有すること

を確認した。これにより、実運用に即した走行速度で維持管理上注意すべき規模の変状を捉える能力があることを証明した。

#### 第4章 Iterative Closest Pointに関する検証の結論

本章では、提案手法の中核である ICP アルゴリズムによる変状抽出能力について、模擬変状を設置した実在のり面で検証し、その有効性と堅牢性を実証した。

フィルタリングの効果について、植生や氷柱といったノイズを除去するフィルタリング処理が、変状抽出精度を大幅に向上させることを定量的に示した。フィルタリングを適用することによって、40mm のはつり落としや 10mm 厚のシートといった模擬変状を背景ノイズから分離し、明瞭に抽出することに成功した。

点群密度の影響について、サンプリング処理により点群密度を意図的に低下させる検証を行い、フィルタリング後のデータであれば点群数が元の 3 分の 1 から 4 分の 1 程度に減少しても、模擬変状を安定して検出できることを明らかにした。この結果は、本手法が必ずしも最高スペックの MMS や徐行程度の低速での走行を必要とせず、より汎用的な条件下でも適用可能な実用性と堅牢性を備えていることを示している。

#### 第5章 応用検証の結論

本章では、基礎検証で得られた知見を基に、より実務に近い条件下での応用検証を行って、本手法の広範な実用性を証明した。

実環境での有効性について、広域のり面を対象とした解析においても、フィルタリングと変状表示の閾値設定を組み合わせることで、ノイズが多い環境下でも目的の変状を効果的にスクリーニングできることを示した。また、アンカー設置やコンクリート補修といった実際の対策工事の前後で取得したデータを比較し施工による形状変化を正確に捉えられることを実証した。

データ連携と将来性について、仕様の異なるレーザスキャナで取得されたデータ間でも、適切な前処理を施すことで変状抽出が可能であることを示し、異なる時期や機材で取得されたデータの相互利用の可能性を拓いた。さらに、汎用 MMS (地図情報レベル 500 仕様) で要求される点群密度と精度を通常の走行速度で達成可能であることを考察し、本手法は i-Construction が目指す 3 次元データ活用の枠組みの中で、速やかに社会実装できるポテンシャルを持つことを結論付けた。

現在の国際的研究動向を踏まえた本研究の意義と今後の展望として、本研究で確立した手法は、国内のインフラ維持管理に新たな道筋を示すものであるが、その価値は国際的な研究潮流の中に位置づけることでより明確になる。以下、それについて述べる。

##### ○分析の高度化

本研究では手法の「精度」を定量的に評価したが、国際的な最先端の研究は検出された変化が計測誤差か、あるいは意味のある「変状」なのかを科学的に判断するフェーズへと移行している。Kalenjuk ら (2023) が提唱する「厳密な変形解析」は、複数回のデータ計測による経験的な方法と学習された確率モデルによる予測の両方で導き出し、変状の統計的有意性を評価するものであり、これを導入することで本手法の分析結果の信頼性を飛躍的に向上させることができる<sup>21)</sup>。今後の課題とし

て、この統計的アプローチを統合してより客観性の高い変状評価手法を確立することが期待される。

### ○AI 活用の具体化

本研究が将来展望として掲げる「AI による自動変状解析」は、国際的な研究動向を調査すると ICP アルゴリズムは有効な手法であるが、植生やノイズが多い環境では限界がある<sup>22)</sup>。この課題に対して Gojcic ら(2019)が開発した深層学習ベースの 3D 特微量記述子「3DSmoothNet」は、点の幾何学的特徴を学習することでノイズに対して安定した点対応を可能にする<sup>23)</sup>。このような 3D 特微量記述子ベースのマッチングは、ICP が苦手とする条件下での解析精度を劇的に向上させるだろう。

さらに、変状の「検出」から「解釈」へと深化させるためには、セマンティックセグメンテーション技術が鍵となる<sup>24)</sup>。点群の各点に「コンクリート」「植生」といった意味情報を付与することで、幾何学的变化と組み合わせる「セマンティック変化検出」<sup>25)</sup>は、「コンクリート部分でのはらみ出し」といった高度な変状分類の自動化を実現するものであり、本研究が目指すインテリジェント・メンテナンスの核心的技術となりうる。

### ○計測の統合化

MMS 単独での計測は、のり面上部などに原理的な死角が生じる。この限界を克服するために、国際的には UAV (無人航空機) とのデータ融合が積極的に研究されている<sup>26)</sup>。MMS が提供する側面からの情報と、UAV が提供する上面からの情報は相互補完が可能であり、両者を統合することで死角のない完全な 3 次元モデルの構築が可能となる<sup>27)</sup>。さらに、データ融合は単に欠損を補うだけでなく、個別のセンサーデータを上回る精度を達成しうるとの報告もあり<sup>28)</sup>、本研究で培った ICP 技術は、これらの異種点群を高精度に位置合わせする基盤技術として直接応用可能である。

### ○研究の最終目標（仮想空間モデルと予防保全への貢献）

本研究の成果は、インフラ維持管理の究極的な目標である仮想空間モデルの構築と予防保全の実現に貢献するものである。この仮想空間モデルに、部材名称、材質、設計図書、過去の補修履歴といった属性情報を付与して連携させることで、モデルは単なる 3 次元の「形状」から、検索や分析、シミュレーションが可能な「知的データベース」へと進化させることができる。この知的データベースは、物理資産とリアルタイムデータで連携する動的な仮想モデル、すなわちデジタルツインへと発展するポテンシャルを秘めている<sup>29)</sup>。Pregnolato ら(2022)がクリフトン吊り橋の事例で示したように、デジタルツインは物理的資産の状態を常に正確に反映し、その挙動をシミュレーションすることで、効果的な資産管理を可能にする<sup>30)</sup>。本研究で確立した手法は、まさに物理的のり面の状態をデジタルデータ化し、デジタルツインに供給するための根源的なデータ取得技術として位置づけられる。

そして、本手法によって得られる時系列の 3 次元変状データは、それ自体が最終成果ではなく、将来の「予防保全」システムを駆動するための最も重要な学習データとなる。Liu ら(2022)や Chen ら(2023)の研究では、モニタリングデータを用いて AI モデルを訓練し、降雨時などの斜面安定性を予測する仮想空間モデルが提案されている<sup>31) 32)</sup>。本研究の成果は、このような AI 駆動型の予測モデルを実現するための不可欠な前提技術であり、事後対応的な維持管理から、劣化を予測し先手を打つ真の予防保全へとパラダイムシフトを促す重要な一步であると結論付けられる。

## ○総括

本研究は、汎用 MMS と ICP アルゴリズムを用いて、道路のり面の変状を安全かつ定量的に抽出する実用的な手法を確立した。その成果は、施工段階で作成される BIM/CIM モデルや蓄積された 3 次元データを初期値として、インフラ維持管理に応用できる可能性を示したものである。特に、高速道路本線カルバートボックスの巻き込み部にあるコンクリートブロック張工などをはじめとした膨大な点検数を要する箇所において、点検の負担を大幅に削減できる可能性が高い。

私が勤務する高速道路会社が直面する「インフラの機能低下」と「労働力不足」という二重の危機は、もはや個別の課題ではなく、相互に絡み合う国家的な課題である。熟練技術者の経験と直感に依存してきた従来の点検手法は、客観性の欠如や労働災害のリスク、技術継承の困難さといった構造的限界を露呈している。2012 年の笹子トンネル天井板崩落事故は、その悲劇的な現実を我々に突きつけた。

本研究で確立した手法は、この現状を打破するための一つの解である。危険な現場作業を安全なオフィスでのデータ分析へと転換し、点検員の主観を排除した客観的かつ定量的な 3 次元データを提供する MMS が取得する 3 次元データは、単なる現状把握を超える、仮想空間モデルや AI と融合することで、未来をシミュレーションし、ライフサイクルコストを最適化する、まさに NEXCO 東日本が目指している「スマートメンテナンス」の基盤となる。

無論、この変革には初期投資などのコストを伴う。しかし、これは単なる技-術革新のためのコストではない。日本経済の大動脈を守り、点検作業員のリスクを低減し、そしてインフラの安全と信頼を未来の世代へ確実に引き継ぐために必要不可欠な「未来への投資」である。我々、高速道路に携わる者こそがこの変革を強く意識し、推進していく必要がある。MMS の導入は、もはや選択肢の一つではなく、日本の未来に対する責務であり、必須要件であると確信している。

## 謝 辞

指導教官である岡山大学大学院 西山先生には、本研究のテーマ設定から査読論文投稿、論文完成までに留まらず、懇切丁寧なご指導を賜りました。先生のご指導なくしては、本研究を完成させることはできませんでした。心より感謝申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、終始懇切丁寧なご指導を賜りました岡山大学 木本准教授、吉田准教授に心より感謝申し上げます。先生らのご指導なくしては、本研究を完成させることはできませんでした。また、研究室の皆様には、日々の研究活動において、貴重なご助言や激励をいただきました。特に、佐守さん、三崎さんには、実験データの分析において多大なるご協力をいただきました。深く感謝申し上げます。

大学院への進学と職場の両立問題で、常に相談させていただいた元上司である株式会社ネクスコ東日本エンジニアリング 常務取締役土木事業本部 木曾部長の学業への支えがなければ、本研究を完成することはできませんでした。こころより深く感謝申し上げます。

大学院への進学以前から研究に関して、現場での確認含めて、ご指導いただいた株式会社ネクスコ東日本エンジニアリング 永井テクニカル・フェロー、東日本高速道路株式会社 中野上席土工指導役に深く感謝申し上げます。

現職場である株式会社 高速道路総合技術研究所 松崎代表取締役社長、池田総括研究主幹、水門研究企画部長をはじめとした職場の皆様のご理解とご協力がなければ、本研究を完成させることはできませんでした。深く感謝申し上げます。

そして、大学院で学ぶ機会を設けてくださった、岡山大学 西垣名譽教授との出会いがなければ、本研究に出会うことすらありませんでした。感謝しても感謝しきれません。こころより深く感謝申し上げます。

再度に、妻にはたくさん心配をかけてしましましたが、いつも応援してくれたことに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 高速道路リニューアルプロジェクト - NEXCO 中日本 | 高速道路の保全・サービス | 事業案内 | 企業情報, <https://www.c-nexco.co.jp/koushin/> , 2025年6月19日取得
- 2) 高速道路の現状：高速道路リニューアルプロジェクト | NEXCO 東日本, <https://www.e-nexco.co.jp/renewal/status/> , 2025年6月19日取得
- 3) 高速道路の料金制度をめぐる現状と課題 - 参議院常任委員会調査室・特別調査室, [https://www.sangiin.go.jp/japanese/annai/chousa/rippou\\_chousa/backnumber/2023pdf/20230414072.pdf](https://www.sangiin.go.jp/japanese/annai/chousa/rippou_chousa/backnumber/2023pdf/20230414072.pdf) , 2025年6月19日取得
- 4) 高速道路リニューアルプロジェクト - NEXCO 東日本, <https://www.e-nexco.co.jp/renewal/> , 2025年6月19日取得
- 5) 高速道路リニューアルプロジェクト - NEXCO 東日本, <https://www.e-nexco.co.jp/renewal/> , 2025年6月19日取得
- 6) 田村博・漆畠充・大高悦裕・藤井靖弘・白井康裕, ドローンを活用した新たな航空レーザ測量の開発と展開, 静岡理工科大学紀要, Vol. 27, pp41-47, 2019
- 7) 国土交通省 : 地籍調査における測量新技術の活用 , <https://www.mlit.go.jp/common/001204978.pdf>, 2021年7月9日取得
- 8) 小林勝也, 飛島幸則, 山崎崇徳, 岡部貴之, MMSを活用した河川維持管理の効率化・高度化の検討について, 河川技術論文集(土木学会), 24巻, pp245-250, 2018
- 9) 井上浩一, 藤木三智成, 道路舗装等インフラ施設の維持管理段階のMMSデータ利活用手法について, 土木学会中国支部第71回研究発表会, 2019
- 10) 岡本直樹・佐田達典・江守央, モバイルマッピングシステムの走行速度の違いによる標定点を用いた補正効果の検証, 土木情報学シンポジウム講演集, Vol. 41, pp35-38, 2016
- 11) CloudCompare open source project : CloudCompare, <http://www.danielgm.net/cc/>, 2021年7月9日取得
- 12) 平面直角座標系(平成十四年国土交通省告示第九号) : 国土交通省国土地理院, <https://www.gsi.go.jp/LAW/heimencho.html>, 2021年7月15日取得
- 13) 【岡田清・森忠治・内田修・小泉俊雄・村上真幸・守田秀則, 測量学【第2版】】 , 東京電機大学出版局, pp198, 2014】
- 14) 小白井亮一: わかりやすいGPS測量, オーム社, p. 41, 2010.
- 15) 一般社団法人 社会基盤情報流通推進協議会 : 国土交通データプラットフォーム, <https://www.mlit-data.jp/platform/>, 2022年1月31日取得
- 16) BIM/CIM活用ガイドライン(案)第5編 道路編 , 令和3年3月, 国土交通省, p140, 2021.
- 17) 第5次社会資本整備重点計画, 令和3年5月28日, 閣議決定, 国土交通省, 2021.  
22) 石川貴一朗:Mobile Mapping Systemによる道路測量について, 精密工学会誌, Vol. 79, No. 5, pp. 397-400, 2013. [Ishikawa, K.: Road survey using mobile mappingsystem, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 79, No. 5, pp. 397-400, 2013.]
- 18) 移動計測車両による測量システムを用いる数値地形図データ作成マニュアル(案), 平成24年5月, 国土交通省国土地理院, 2012.
- 19) 藤村大輔, 山口裕哉, 白石宗一郎, 岩上弘明, 佐田達典, 江守央: MMSの走行速度と計測精度との関係に関する基礎的研究, 土木学会論文集, Vol. 75, No. 2, p. II\_79-II\_86, 2019. [Fujimura, D., Yamaguti, Y., Shiraishi, S., Iwakami, H., Sada, T. and Emori, H.: A basic study on the relationship between the driving speed and the measurement

- precision of MMS, *Journal of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 75, No. 2, p. II\_79-II\_86, 2019.]
- 20) 間野耕司, 石井一徳, 平尾公孝, 橘菊生, 吉村充則, Devrim Akca, Armin Gruen: 移動計測車両測量システム (MMS) により取得される点群の精度評価, *写真測量とリモートセンシング*, Vol. 51, No. 4, pp. 186-200, 2012. [MANO, K., ISHII, K., HIRAO, M., TACHIBANA, K., YOSHIMURA, M., AKCA D. and GRUENF, A.: A Study on Accuracy Investigation of Point Clouds Generated by the Mobile Mapping System (MMS), *Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 51, No. 4, pp. 186-200, 2012.]
- 21) Kalenjuk, S., & Lienhart, W. (2023). Drive-by infrastructure monitoring: a workflow for rigorous deformation analysis of mobile laser scanning data. *Structural Health Monitoring*, 23(1), 94-120.
- 22) Jiang, M., et al. (2024). 3D deformation analysis for earth dam monitoring based on multi-period terrestrial laser scanning point clouds. *Frontiers in Earth Science*, 12.
- 23) Gojcic, N., Zhou, C., & Wieser, A. (2019). Robust pointwise correspondences for point cloud based deformation monitoring of natural scenes. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W13, 43-50.
- 24) Diakite, A. A., & Zlatanova, S. (2020). Deep learning for semantic segmentation of urban-scene point cloud: A state-of-the-art review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(5), 321.
- 25) de Gélis, I., Corpetti, T., & Lefèvre, S. (2024). Change detection needs change information: Improving deep 3-D point cloud change detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62, 1-10.
- 26) Duarte, A., et al. (2025). Monitoring Slope Stability: A Comprehensive Review of UAV Applications in Open-Pit Mining. *Geosciences*, 14(6), 1193.
- 27) Doumit, J. (2021). Lidar or Photogrammetry? Why Not Use Both?. *GIM International*, (3), 21.
- 28) Sun, G., et al. (2023). A novel method for landslide deformation monitoring by fusing UAV photogrammetry and LiDAR data based on each sensor's mapping advantage in regards to terrain feature. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14(1).
- 29) Al-Adhami, M., & Makana, L. (2023). Reshaping the Digital Twin Construct with Levels of Digital Twinning (LoDT). *Buildings*, 13(12), 3021.
- 30) Pregnolato, M., et al. (2022). Towards Civil Engineering 4.0: Concept, workflow and application of Digital Twins for existing infrastructure. *Automation in Construction*, 141, 104415.
- 31) Liu, Z., et al. (2022). Development of a slope digital twin for predicting temporal variation of rainfall-induced slope instability using past slope performance records and monitoring data. *Engineering Geology*, 308, 106825.
- 32) Chen, G., Kang, X., Lin, M., Teng, S., & Liu, Z. (2023). Stability Prediction of Soil Slopes Based on Digital Twinning and Deep Learning. *Applied Sciences*, 13(11), 6470.