

## 3D 小型 LiDAR の用途拡大に向けた精度検証

### Verification of Precision for Expanded Applicability of Compact 3D LiDAR

#### キーワード

LiDAR, レーザー反射強度, DBSCAN, 回転行列, 移動行列, リジット変換

前田 幸男\*, 黒田 千歳\*, 大江 隆史\*,  
山口 和也\*\*, 京免 継彦\*\*,  
中田 範俊\*\*\*, 小野 知義\*\*\*\*

#### 研究概要

近年、自動運転やロボット技術の発展に伴い、広い視野角を持つ 3D 小型 LiDAR が普及してきた。建設分野においても、測量用の高精度レーザースキャナーに比べ、小型、軽量、低価格であり、リアルタイムな測定が可能なることから、各種用途に用いられるようになってきた。ここでは、新たな用途への適用に向けて、使用条件や測定環境に応じた精度の把握を目的に実施した試験測定について報告する。

試験の結果、LiDAR のマーカー中心検出値の標準偏差は、マーカー面上の点群数が多いほど小さく、点群数は、測定距離、測定時間、マーカー面積・角度の影響を受けること、また、LiDAR 取得値を所定の座標系に変換する場合、基準点となるマーカー配置・LiDAR 位置などが影響を及ぼすことが確認された。

#### 1 はじめに

LiDAR ( Light Detection And Ranging ) とは、レーザー光を照射し、その反射光の情報をもとに対象物までの距離や形状を測定する技術で、近年、自動運転・ロボット・環境モニタリングなどの幅広い分野における技術発展に伴い普及してきた。建設分野においても、測量用の高精度レーザースキャナーに比べ、小型、軽量、低価格で、リアルタイムな測定が可能となることから、各種用途に用いられるようになってきた。

LiDAR の距離測定精度は、レーザー光の反射強度、機器自体のノイズに影響され、反射強度は、測定照射面の反射率、角度や測定対象との距離などに影響を受けることが知られている。

また、LiDAR が取得する点群データの座標原点（物体までの距離を測定する基準点）は、LiDAR の器械中心に近い位置にセンサーが設置されていることが一般的であるが、所定の座標系で、取得点群を評価する場合には、座標原点を把握し、適切な座標系でデータ処理を行うことが重要となる。

言い換えると、LiDAR は、基準点となる既知点（器械点）直上に設置することや後視点を視準することができないため、視野範囲の対象物の形状を測定するセンサーといえる。

このため、LiDAR を測量や変位測定に用いる場合には、2つ以上の座標既知点を基準とし、同一の座標系に変換し

て評価を行うため、LiDAR の精度検証については、LiDAR 自体の距離測定精度（3章）、座標変換後の点群精度に及ぼす影響(4章)について、検討を行うこととした。

#### 2 LiDAR の精度検証の検討項目

##### 2.1 検討対象の LiDAR

検討対象の非回転型（ソリッドステート方式）LiDAR の仕様<sup>2)</sup>を表-1に示す。なお、LS との重量比は約1/27、寸法（体積）比は約1/95となる。

表-1 検討対象の LiDAR 仕様<sup>2)</sup>

性能・項目	仕様・範囲 【LS参照値】	備考 および【LS仕様： TOPCON GLT1203】
寸法	65×65×60 mm 【 282×199.6×428mm】	
重量	265 g 【 7.2kg】	【 バッテリー除く】
レーザー波長	905 nm 【 870nm】	安全性クラス1 【 クラス1】 (IEC60825-1:2014)
視野角 FOV	水平 360° 鉛直 -7°~52° 【 360°】 【 270°】	センサーがカバーする角度 FOV:Field of View
点率 Point Rate	200,000 points/s (first return)	1秒当り点群データの数
検出範囲 10m	23万点/秒	反射率が高いほど大
100m	4.6万点/秒	
検出範囲 @ 100 klx	40 m @ 10% の反射率 70 m @ 80% の反射率	1 m 2 当たり の 光 束 が 1000ルクスの場合 【 0.6~70m @90%反射】
レンジ精度 (1σ)	2cm 以下 (@ 10m @ 反射率80%) 3cm 以下 (@ 0.2m @ 反射率80%)	極端に近いと測定不可 最短測定距離 10cm 【 4~8mm @10~30m90%反射】
角度精度 (1σ)	0.15°以下 【 測角精度3'】	

\* 技術センター 土木研究部, \*\* 技術センター ICT 推進部, \*\*\* 土木事業本部 技術推進部, \*\*\*\* 札幌支店

なお、基準点測定は、トータルステーション（以下 TS）を用い、点群データの比較として、レーザースキャナー（以下 LS）による測定を行った。LiDAR の取得点群数は、図-1に示すように、測定距離が小さい（近い）ほど、測定時間が長いほど多くなる（⇒点群が密になる⇒角分解能が向上する⇒ダイナミックレンジが大きくなる⇒像解像度が高くなる）。このため、基準点とするマーカの大きさ、距離、測定時間を試験条件に設定し、その影響について調べることにした。

## 2.2 検討項目

検討項目は、表-2に示すように、基準点とするマーカの距離測定精度（3章）、座標変換後の点群精度（4章）の2段階を設定した。

基準点とするマーカについては、反射強度で識別したマーカ近傍の点群を DBSCAN<sup>3)</sup>でクラスタリング（異常値を除去）し、検出されたマーカ面上の点群の重心を LiDAR 座標系でのマーカ中心の座標値とした。マーカの基準座標値は、TS で視準・測定した値を用いた。なお、DBSCAN（Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise）とは、密度に基づくクラスタリングで、空間内に存在する点の集合が与えられた場合、密集している点はグループ化され、密度の低い領域にある点を外れ値として扱う一般的なクラスタリングアルゴリズムである（後述3.1.2(2) マーカ中心座標の求め方参照）。

また、座標変換後の点群精度の検討における LiDAR 取得点群の座標変換は、LiDAR と TS の各マーカ測定値より、移動行列、回転行列を求め、LiDAR 取得点群を LS 測定結果と同じ座標系に変換して行った。基準点とするマーカ座標値を TS 測定値と合わせるように、LiDAR 点群を座標変換した結果での評価であり、変換方法については後述（4.1.2試験方法（2）座標変換）のとおりである。

## 2.3 マーカおよびターゲット

マーカおよびターゲットの概要を図-2に示す。

座標変換の基準点とするマーカは、Φ150mmの反射円板の中央に、50mm×50mmの十字線反射シールを貼り、これを三脚に固定し、トンネル内3カ所の8パターンに設置した。

また、通常のトンネル施工における『A計測』で使用されるターゲットについては、マーカの異なる条件（反射シール部の大きさ、形状40mm×40mm）として、模擬トンネル覆工面の点群精度の評価の際に用いた。

## 3 マーカ距離測定精度の検討

### 3.1 試験条件および試験方法

#### 3.1.1 試験条件

LiDAR 取得点群を所定の座標系に変換する際には、基準点となるマーカ座標の測定精度が影響を及ぼすと考

えられる。マーカ距離測定精度の検討においては、表-3に示す条件が測定精度に及ぼす影響について調べた。

### 3.1.2 試験方法

#### (1) マーカ、LiDAR、TS 設置位置

試験は、マーカ、LiDAR、TSを図-3に示す位置に配置し、表-3に示す条件で、実験棟内で測定した。

移動量については、スライドレールに取り付けたマーカに対し、LiDAR、TS それぞれの移動前後の座標値差より求めた。また、マーカ角度は、マーカ面と LiDAR 照射方向の角度が垂直時を $\angle\theta=0^\circ$ とした。

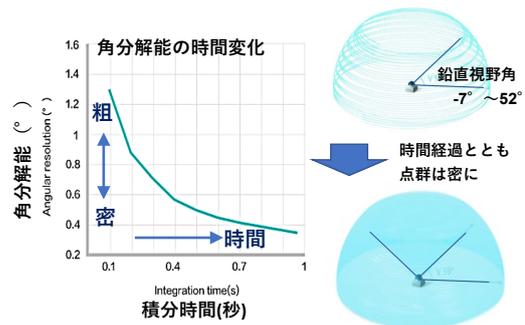


図-1 LiDAR の角分解能の時間変化（<sup>2)</sup>に加筆）

表-2 検討項目

検討事項	実施内容	試験条件
距離測定精度の検討 マーカの測定精度 DBSCANの中心検出精度	基準点のマーカ座標値の精度について、 ・LiDARのパラッキ（σ）の検証 ・TS測定値との比較	・測定距離、測定回数、測定時間、マーカ面角度（照射角） ・マーカ移動量
座標変換後の点群精度の検討 模擬トンネル覆工面の点群精度の評価（LSとの比較）	・模擬トンネル覆工面測定において、マーカ配置パターンが座標変換に及ぼす影響など、LS測定結果と比較し、点群の精度を検証	・マーカ配置パターン ・座標変換方法



図-2 マーカおよびターゲットの概要

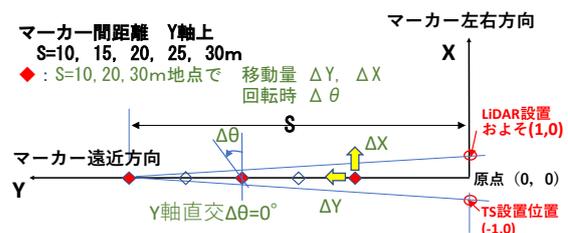


図-3 試験方法（LiDAR、TS、マーカの設置位置）

(2) マーカー中心座標の求め方

LiDARによるマーカー中心の求め方を以下に示す。

- ① LiDARの反射強度データより、所定のしきい値以上となる点群を抽出し、マーカー面の反射シール部の反射強度が大きくなる範囲を識別・検出する。
- ② DBSCANによりマーカー面上の点群を取得（はずれ値を除去）する。
- ③ 取得したマーカー面上の点群の重心を求め、これをマーカー中心座標値とする。

なお、座標精度については、別途測定したTS結果（マーカー中心の視準測定値）との差で評価した。

LiDARにより取得するマーカー中心座標値の精度に影響を及ぼすと考えられる要因を表-4に示す。

3.2 試験結果

3.2.1 測定距離、測定時間の影響

測定時間・測定距離と取得点群数の関係は、図-4に示すように、測定時間が長いほど、測定距離に近いほどDBSCAN後のマーカー面上の点群数は多くなっている。

図-5に示す取得点群数とX,Y,Z方向の標準偏差σ（3回測定のパラツキ）を見ると、取得点群数が多いほど（測定距離に近いほど）σは小さく、また、X,Y,Z方向を比べると左右：X方向のσが若干小さくなっている。

図-6左に測定距離の増加に伴う取得点群の低下状況を示す。同図は、測定距離Sに対して、S=10mを基準とした各測定距離における点群数の低下率を示しており、図中の点線で示す面積低下率は、距離の増加に伴う点群密度の低下を示すもので、(1)式、(2)式より算出した。

$$\text{取得点群数の低下率} = 1 - \left( \frac{\text{各地点の点群数}}{10\text{m地点の点群数}} \right) \quad (1)\text{式}$$

$$\text{面積比低下率}(\text{:点群密度低下率}) = 1 - \left( \frac{10\text{m}}{\text{測定距離}} \right)^2 \quad (2)\text{式}$$

点群の低下率は、S=0~25mまでは、面積比低下率（図中点線）とほぼ同じ変化を示しているが、S=30mでは、面積比低下率88.9%より減少しているが、これは、30m程度で反射強度が減少し、しきい値判定により有効な点群数が減少したためである。また、点群数の増加に伴い、標準偏差は小さくなる（図-6右）。

3.2.2 マーカー角度の影響

マーカー角度（LiDAR照射角）とマーカー面上の取得点群数の関係を図-7に示す。測定距離S=10m, 20mの場合には、角度の増加とともに点群数が減少していることがわかる。なお、S=30mのθ=30°, 45°においては、標準とした反射強度240-255で抽出できなかったため、しきい値を低くしたため、点群数が増加している。マーカー角度の影響については、マーカーの回転に伴い、LiDAR照射投影面積の変化により、点群数もcosθ分

表-3 試験条件（マーカー距離測定精度の検討）

測定条件	測定ケース	備考
測定距離（反射強度、点群密度）	10, 15, 20, 25, 30 m	(3回測定時の)パラツキを評価
測定時間（点群密度）	15, 30, 60 秒	
マーカー角度*（反射強度、投影面積）	0(垂直照射), 15, 30, 45°	LiDAR, TSの各座標系で移動量比較
マーカー移動量*	遠近方向: 10, 20, 30mm 左右方向: 10, 20, 30, 40mm	
測定回数（パラツキの評価）	全ケース: 3回測定	各ケース共通 DBSCANによる中心座標を評価
マーカー識別時の反射強度しきい値	255以上（マーカー面上点群数が少ない場合は変更）	

\*マーカー角度、移動量は、測定距離10, 20, 30, 地点で実施

表-4 中心座標値の精度に影響を及ぼす要因

中心座標の精度	高い ⇔ 低い
○反射強度値	大 ⇔ 小
測定対象面	反射シール部 ⇔ 反射シール以外
距離	近 ⇔ 遠
マーカー角度	小 ⇔ 大
○マーカー面有効点群数	多 ⇔ 少
LiDAR固有のノイズ	小 ⇔ 大
距離/点群密度	近/密 ⇔ 遠/粗
角度/投影面積	小/広 ⇔ 大/狭
測定時間	長 ⇔ 短
反射強度しきい値	低 ⇔ 高

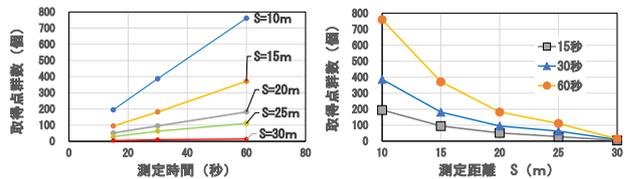


図-4 測定時間（左）、測定距離（右）と取得点群数

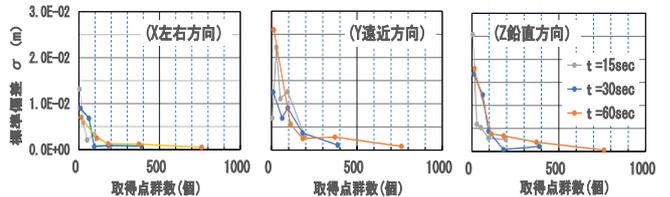


図-5 取得点群数とX,Y,Z方向の標準偏差

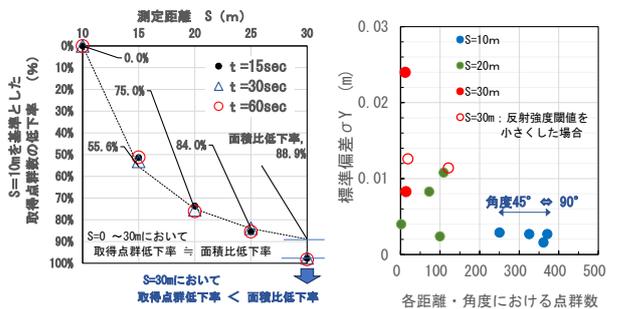


図-6 左：測定距離と点群数 右：点群数と標準偏差

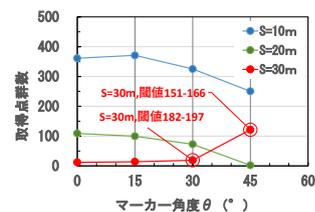


図-7 角度と取得点群数

の変化が生じると考えられる。各距離において、 $\Delta\theta = 0^\circ$  を基準とした点群数の変化率および LiDAR 照射投影面積比  $\cos\theta$  について整理した結果を図-8に示す。

同図より、 $S=10m$  の場合では、点群数の変化率と投影面積比  $\cos\theta$  は同様の変化をしている。対して、 $S=20m$  の場合では、 $\Delta\theta$  の増加に伴い、点群変化率が投影面積比  $\cos\theta$  よりも低くなっていくことがわかる。これは、測定距離がある程度長くなると、マーカー角度の影響を受けやすくなり、反射強度の低下に伴うしきい値判定により点群数が減少したことが原因と考えられた。

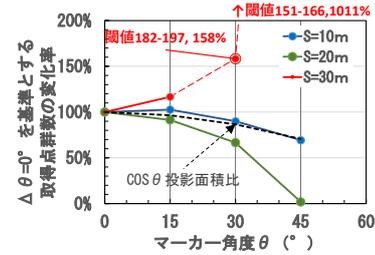


図-8 点群数の変化率

### 3.2.3 マーカー移動量の測定結果

#### (1) 移動量の標準偏差

図-9に、距離  $S=10m, 20m, 30m$  における移動量 ( $\Delta X, \Delta Y$ ) と移動量の標準偏差 ( $\sigma \Delta X, \sigma \Delta Y$ ) の関係、および、図-10に、各測定条件におけるマーカー面取得点群数と移動量の標準偏差 ( $\sigma \Delta X, \sigma \Delta Y$ ) の関係を示す。なお、移動量は、マーカー中央検出値の移動前後の各成分の差を、また、標準偏差は3回の測定値より求めている。

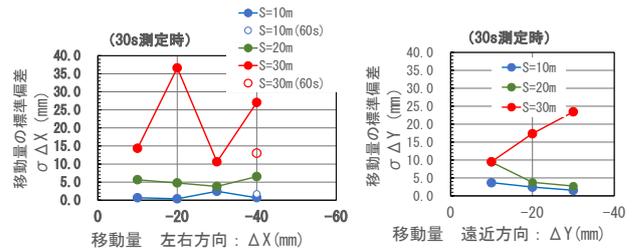


図-9 移動量と移動量の標準偏差

(左：X成分，右：Y成分)

$S=30m$  の場合に、 $\sigma \Delta X, \sigma \Delta Y$  ともにバラツキが大きく、標準偏差は大きな値を示している(図-9)。また、取得点群数(図-10)をみると、 $S=30m$  の場合、平均取得点群数は17.4個と小さく、標準偏差  $\sigma$  の平均=19.9mmとバラツキは大きい、 $S=20m$  以下では、平均取得点群数が112.6個以上に増加し、バラツキも小さく  $\sigma=5.2mm$  程度以下となった。なお、点群数については、3回測定 of 平均値を、また、図中の各距離平均(+プロット)は、各測定距離における X および Y 方向の各移動量 (10~40mm) の標準偏差  $\sigma$ 、点群数の平均値を示している。

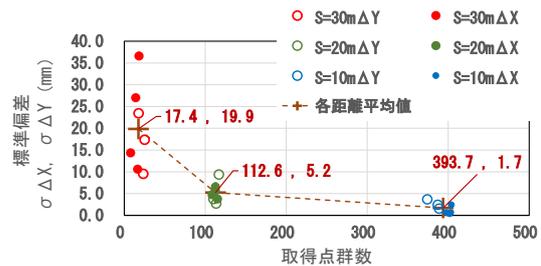


図-10 各測定条件におけるマーカー面取得点群数と移動量 (10~40 mm) の標準偏差

#### (2) LiDAR と TS の移動量の比較

各測定距離  $S$  の場合について、TS と LiDAR の移動量の関係を、図-11、図-12に示す。なお、LiDAR 移動量は3回測定の平均値とし、TS 移動量は、マーカー視準の1回の測定値としている。なお、ここでは、TS 測定値が真値に近いと仮定し、LiDAR と TS の移動量の差分の絶対値を『誤差』と表記している。

LiDAR と TS の関係をみると、 $S=30m$  の場合、両者の差は大きい、 $S=20m$  以下の場合には差は小さく、図-11中の 1:1 ラインに近い値を示している。誤差についても、 $S=30m$  の場合が大きく、 $S=20m$  以下では誤差は10mm程度以下となり、遠近方向移動量の  $\Delta Y$  より左右方向の  $\Delta X$  の方が、若干、誤差が小さい傾向を示している(図-12)。

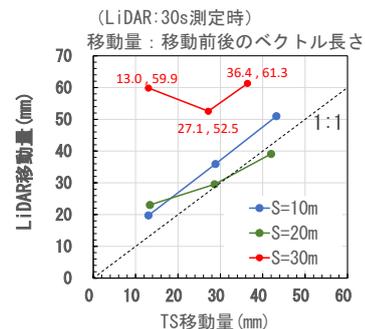


図-11 各測定距離における TS と LiDAR の移動量

### 4 座標変換後の点群精度に及ぼす影響

前章「3. マーカー距離測定精度の検討」では、座標変換時の基準点とするマーカーの測定精度について検討した。

本章では、模擬トンネルの内空面の測定を行い、座標

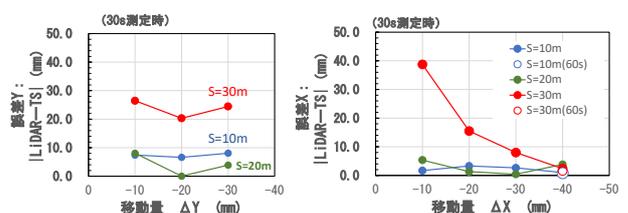


図-12 各測定距離における移動量と誤差

変換後の点群精度（トンネル内空面の面的評価）に及ぼす影響についての検討結果を示す。

#### 4.1 試験条件および試験方法

##### 4.1.1 試験条件

###### (1) 模擬トンネル

試験に用いた模擬トンネル概要、測定概要を図-13、図-14に示す。試験は、模擬トンネル中央部付近のターゲット（天端3カ所、左右 SL 部各3カ所：A 計測を想定）および覆工コンクリート面を測定した。

###### (2) マーカー配置パターン

マーカー配置が、座標変換後の点群精度に及ぼす影響を調べる目的で、図-15に示すマーカー配置パターンを設定した。マーカーは3カ所（m1, m2, m3）に設置し、LiDAR を右に配置したパターン1~4、中央に配置したパターン5~8の計8パターンを設定した。

なお、各マーカーの高さは、m1=1.086m, m2=1.264m, m3=1.804mと測定距離とともにマーカーを高くした。

##### 4.1.2 試験方法

###### (1) 測定手順

各マーカー配置パターンの LiDAR 測定値を座標変換し、LS 結果と比較するまでの流れを以下に示す。

- ① LiDAR による測定を3回実施
- ② 反射強度よりマーカー部点群の抽出
- ③ DBSCAN（外れ値を除去）により、マーカー面上の点群を取得
- ④ DBSCAN 識別後の点群データの重心を求め、マーカー中心の座標とする
- ⑤ 別途 TS で測定したマーカー座標を基準値として、点群を座標変換する移動行列、回転行列を求め、LiDAR 測定の点群を LS と同じ座標系に変換する（変換方法は後述(2) 座標変換方法）
- ⑥ 変換後の LiDAR 測定点群と LS 測定値を比較し、マーカー配置パターン等の影響を評価する

###### (2) 座標変換方法<sup>4)</sup>

3D 点群データを基準点に合わせる座標変換の方法としては、ICP（Iterative Closest Point）法、アフィン変換、ヘルマート変、ベストフィット法などが知られている。

本検討では、拡大・縮小などを行わず、形状を保持したままの平行移動・回転のみの操作となる変換（リジッド変換）方法により、LiDAR のマーカー基準（中心検出値）と目標マーカー（TS 測定値）間の移動・回転行列を求め、LiDAR の取得点群を TS および LS の座標系に変換した。

変換の手順を以下に示す（図-16）。

- ① Tm1, Tm2, Tm3 : TS 座標系でのマーカー測定値,  
Lm1, Lm2, Lm3 : LiDAR 取得点群より DBSCAN で検出したマーカー中心値を求める

- ② 測定位置に近い Tm1 と Lm1 を合わせる
- ③ m1 点で回転させ、Tm1-Tm2 線分と線分 Lm1-Lm2 線分を合わせる
- ④ m1-m2 を軸に回転させ、マーカー3点を同一平面とさせる

①~④となる変換行列を求め、点群の変換を行う。

なお、同変換は、リジッド変換であり、各座標系の形状（図中の各座標系の三角形）を保持しながら位置と向きを変更（回転）させ、スケーリング（サイズ変更）は行わないため、各座標系の点群形状の比例関係がそのまま維持される（変換前後のマーカー間距離の変化はない：△m1-m2-m3の形状変化はなし）。

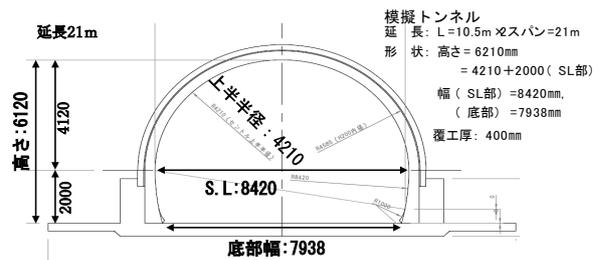


図-13 模擬トンネルの概要

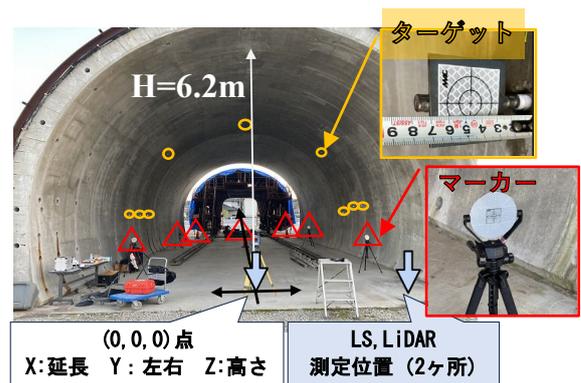


図-14 測定概要

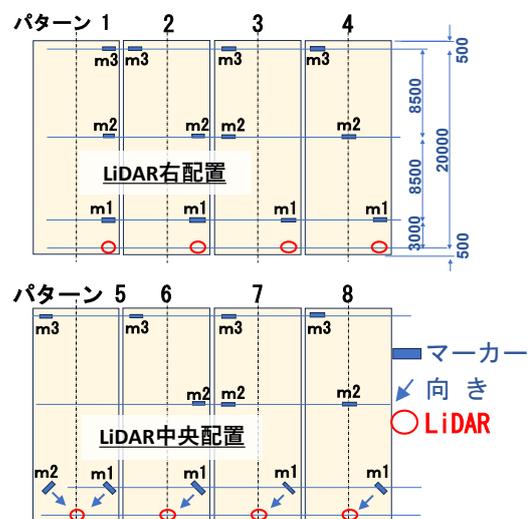


図-15 マーカー配置パターン

## 4.2 座標変換後の点群精度に及ぼす影響試験結果

マーカー配置パターン1～8（図-15参照），測定回数3回の条件で測定したマーカー，ターゲット，模擬トンネル内空面に対して，座標変換の影響を受けないマーカー間距離，座標変換の影響を受けるマーカーおよびターゲットの座標値差，模擬トンネル内空面の点群の差についてTS・LS測定結果と比較し，座標変換後の精度に及ぼす影響について検討した。

### 4.2.1 マーカー間距離およびマーカー座標値

#### (1) マーカー間距離

変換前後で変化しないマーカー間距離：m1-m2，m2-m3，m3-m1（図-16中の各座標系の三角形の各辺相当）の差（LiDAR—TSの絶対値）を図-17に示す。

マーカー間距離の差の最大値は13.6mm（パターン3のm1-m2）となり，各パターンの全平均をみると，LiDARを中央配置したパターン5～6の場合にマーカー間距離の差が小さくなっている。

#### (2) マーカー座標値

変換後のマーカー座標値差を図-18示す。座標値差は，(3)式に示すベクトル長さであり，マーカーm1については，リジット変換時の一致点であるので，全ケースにおいて，座標値差は0となる。

同図より，LiDARから離れたm3点の座標値差が比較的大きく，パターン4の場合に最大値36.6mmとなった。

$$\text{座標値差} = \sqrt{(X_{Li} - X_{TS})^2 + (Y_{Li} - Y_{TS})^2 + (Z_{Li} - Z_{TS})^2} \quad (3\text{式})$$

ただし LiDAR 座標値  $(X_{Li}, Y_{Li}, Z_{Li})$   
 TS 座標値  $(X_{TS}, Y_{TS}, Z_{TS})$

#### (3) マーカー間距離とマーカー座標値の差

リジット変換の場合に影響を受けないマーカー間距離の差は最大13.6mm程度であったが，変換後のマーカー座標値差は，マーカー配置パターンにより変化し，最大で36.6mmとなった。このことから，LiDAR点群を所定の座標系に変換する場合，基準点となるマーカーの配置，変換方法が，LiDAR点群精度に影響を及ぼすと考えられる。

そこで，図-17，図-18を再整理し，マーカー間距離の差（3辺平均値）と座標値差（m2，m1の平均値）の関係を図-19に示す。なお，同図中○プロットは1～3回の測定値を，+プロットは，パターン1～8の3回測定の平均値を示している。

同図より，LiDARを中央設置したパターン5～8に対して，右側壁に設置したパターン1～4の差が大きく，特に，パターン1については，1～3回測定値の変動幅も大きくなっていることがわかる。各パターンとも，3回の測定時には，LiDAR，マーカーともに不動状態での測定であるので，1～3回測定の変動は，LiDAR自体のノイズ，マーカー面上点群数のバラツキによる，中心検出値のバラツキなどが影響したものと思われる。

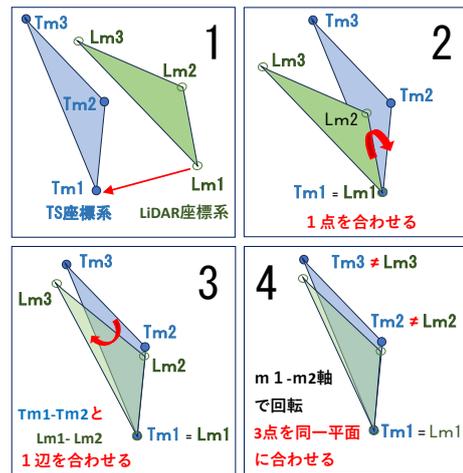


図-16 点群変換方法の概要

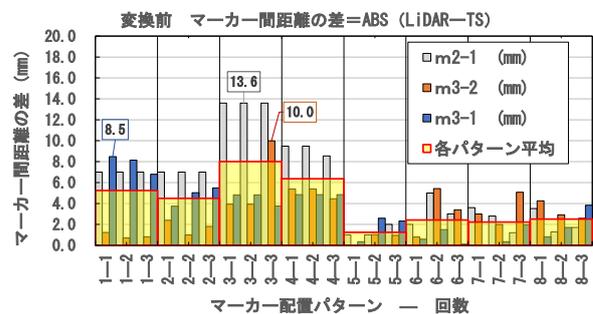


図-17 変換前のマーカー間距離の差

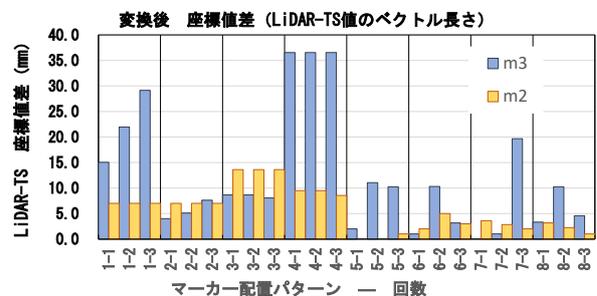


図-18 変換後マーカー座標値の差

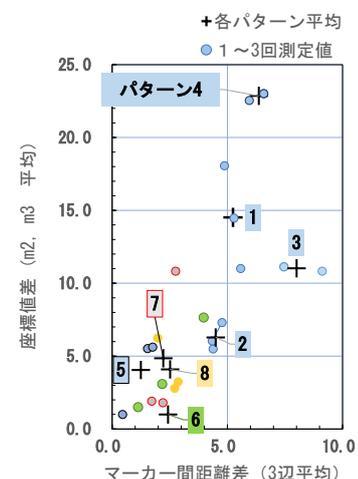


図-19 マーカー間距離差と座標値差の関係

#### 4.2.2 ターゲット位置の精度

模擬トンネルの中央付近の左右 SL 部および天端部に取り付けたターゲット（図-14「測定概要」参照）の測定精度について、LiDAR と TS 測定結果の比較を行った。

なお、ターゲットは、DBSCAN の中心検出値である。

##### (1) ターゲット間距離の比較

ターゲットの配置および TS によるターゲット間距離を図-20に、各パターンでのターゲット間距離の比較結果を図-21に示す。

マーカー間距離は、前述のように変換の影響を受けないが、ターゲット間距離についても同様であるが、LiDAR の測定位置（パターン1～4：右側，パターン5～8：中央），測定回数による変動，ターゲット中心検出精度などの影響により，ターゲット間距離が変動したと思われる。

変動幅は SL 部の中央 T4-T5, SL 手前 T6-T7 の場合に小さく，TS との差も小さい結果となった（図-21上）。対して，SL 部奥 T8-T9, および上半部の場合，変動幅，TS の差も大きい傾向にある。

なお，TS 測定値については，中央部設置の1回の測定結果を示している。

##### (2) 座標変換後のターゲット誤差：LiDAR と TS 測定値差

マーカー配置パターンに対して，各ターゲットの座標値誤差（座標変換後，LiDAR，TS を同じ座標系とした時の各座標値の差：仮に，TS 測定値が真値として誤差と表記）を図-22示す。

同図より，ターゲット間距離の場合，各パターンに対する変動幅は，20～30mm，TS との差は±20mm程度であった（図-21）のに対し，座標値誤差は，パターン8の場合200mm以上となった（下図）。また，誤差0～100mm範囲に縦軸を拡大した上図をみると，パターン，ターゲット位置により誤差は変化しているが，上半の誤差がやや大きく，また，パターン別にみると，パターン3，5，6，7の誤差が比較的小さくなっている。

##### (3) ターゲット間距離とターゲット座標値誤差について

各々の座標系で求めたターゲット間距離は，変換の影響を受けず，リジット変換の場合には，変換前後のマーカー間距離は同じとなるが，パターン1～8の1～3回の測定値の変動は，LiDAR 自体のバラツキやターゲットとの

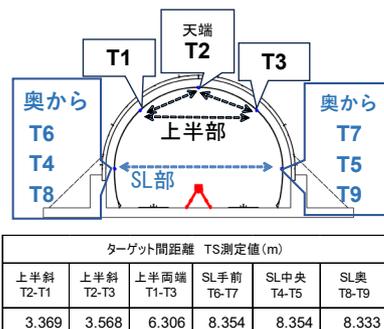


図-20 ターゲットの配置，TSによるターゲット間距離

測定距離，角度，中心検出精度などの影響によるものと考えられる（図-21）。また，ターゲット座標値誤差（LiDAR と TS 差）は，座標変換の影響を受け，パターン8の場合のように，誤差を拡大する場合もあるため，マーカー配置に留意する必要がある（図-21）。

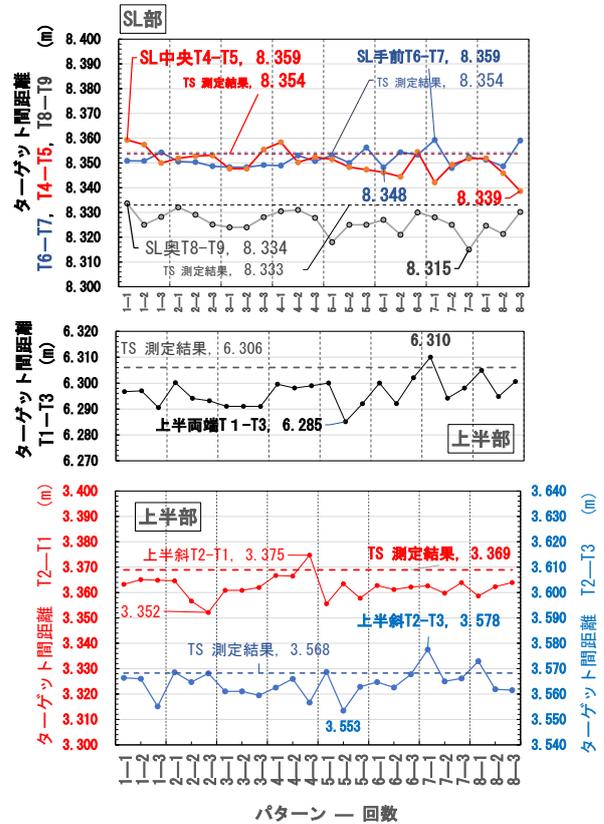


図-21 ターゲット間距離

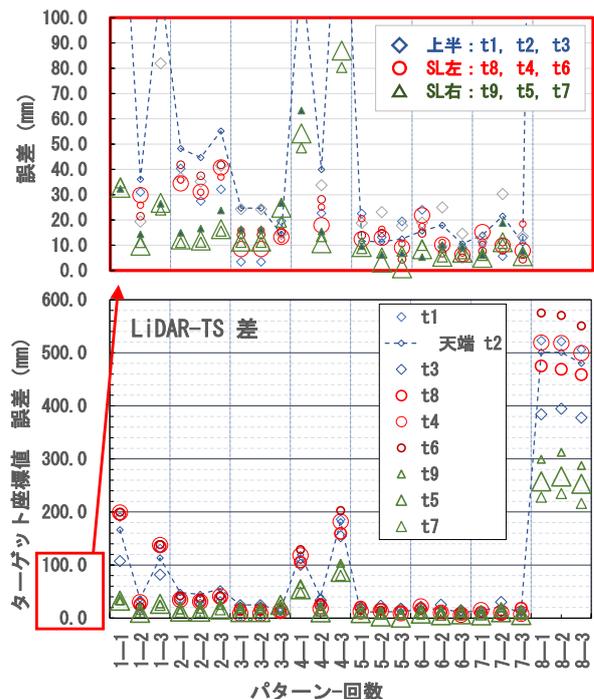


図-22 配置パターンに対するターゲットの誤差

### 4.3 座標変換前後のトンネル内空面の点群精度

前節までは、マーカーおよびターゲットの中心検出値について検討を行った。本節では、模擬トンネル覆工内空面を測定した点群データに対して、LiDARとLS（レーザースキャナー）について、同一座標系に変換後の両者の比較をした結果などについて示す。なお、LS測定は、トンネル中央（原点）に設置して測定した1回の値である。

#### (1) 座標変換前のLiDARとLSの測定点群

図-23に測定結果例としてパターン5-1の場合の座標変換前のLiDARおよびLSの測定点群を示す。

同図のLiDAR測定位置付近のトンネル上下部の点群の無い部分は、視野角範囲外であり、LSの場合は範囲が小さく計器下面のみとなっている。また、点群表示の色は、反射強度(Intensity)を示し、青く緑く黄く赤の順の表示となっている。LiDARでは、ターゲット、マーカー個所の反射強度が大きくなっており、LiDAR、LSともに、測定箇所から遠ざかるにしたがって低く（青色が強くなる）になっている。また、同図点群については、トンネル範囲外およびトンネル内の覆工面外の人や資機材部の点群データの除去範囲は、LiDAR、LS厳密には等しくないが、トンネル内点群数は、LS：2653万点に対し、LiDAR：321万点と約8倍以上となっている。

#### (2) 座標変換後の点群の断面(Y-Z面)における比較

マーカー配置パターン1~8に対して、LiDARで取得した点群データをLSと同じ座標系に変換（リジット変換）し、両者を比較し、座標変換結果に及ぼすマーカー配置の影響等を検討した。

結果例として、座標変換後の差が大きいパターン8-1（1回目）の例を図-24に示す。同図は、トンネル延長方向X=5, 10, 15mの断面において幅 $\Delta X = \pm 0.1m$ の点群を抽出したもので、下表は各断面のY-Z範囲のY（最大幅）、Z（天端部高さ最大値）を示している。延長方向の高低差は、LSでは0.018mに対し、LiDARパターン8-1の場合、変換により、各断面の高低差の最大値が0.515mとなった。

各パターンに対するX=5, 10, 15mの天端高さZおよびSL部トンネル幅（左右SL部のY成分の差）を図-25に示す。なお、図中のAVGおよび平均は、3断面の平均を示している。

上図の各断面トンネル幅の最大-最小差は、LS：17mmに対して、パターン3（LiDAR3-1）が最も大きく31mm、いずれのパターンにおいてもLiDARから離れたX=15m断面の値が大きく、また、LS測定値との差も大きい。

各断面の天端高さZをみると、最大-最小差は幅Yに比べて大きく、最も大きいパターン8-1の場合に0.515mとなった。いずれのパターンにおいても、LS測定値との差は、天端高さZおよびX=5m断面が大きい。

#### (3) 座標変換後の点群の面的(X-Y-Z)比較

座標変換後のLiDAR点群とLS点群の面的な比較として、マーカー、ターゲット、Y-Z断面の結果が良好となったパターン5-1, 6-1, 7-1の場合について、ベクトル差分解析（TREND-POINT<sup>5</sup>）による）の結果例を図-26に示す。

同結果は、LiDARとLSの任意の同一範囲の点群の面の法線ベクトルの差分、言い換えると、概ね覆工厚方向のLiDAR-LSの差を示している。同図において、差分20mm以上の範囲を黄緑点群で示しているが、各ケースともに、LiDARから離れた（Xが大となる）位置での差分が大きくなる傾向を示している。また、パターン7-1のケースでは、差分20mm以上の範囲が小さくなっているといえる。

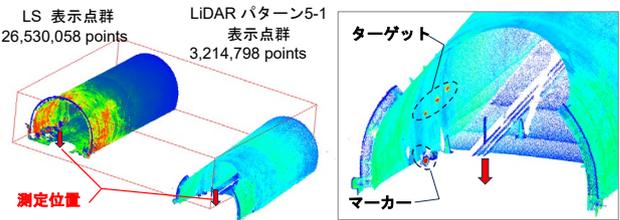
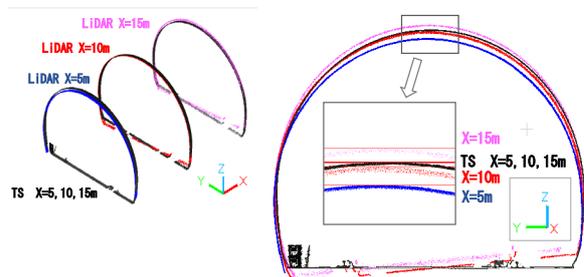


図-23 点群測定例（変換前：パターン5-1の場合）



LiDAR 8-1 (m)				LS (m)			
X 延長	色	Y幅	Z高さ	X 延長	色	Y幅	Z高さ
5	青	8.477	6.086	5	黒	8.438	6.197
10	赤	8.480	6.547	10		8.434	6.179
15	マゼンダ	8.487	6.601	15		8.452	6.186
最大-最小差		0.010	0.515	最大-最小差		0.017	0.018

図-24 X=5, 10, 15m断面(Y-Z面)の比較  
(パターン8-1の場合)

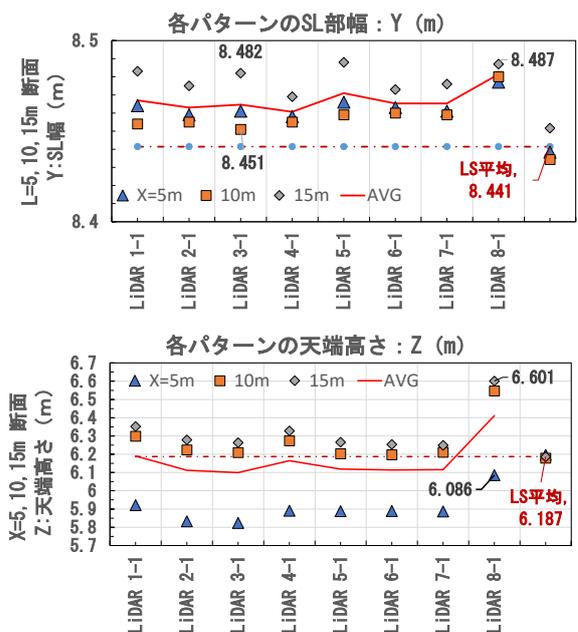


図-25 各パターンに対する所定断面(X=5,10,15m)のトンネル幅(上図)および天端高さ(下図)

#### (4) リジット変換の方法について

本検討の座標変換（前述4.1.2 (2) 座標変換方法参照）では、一致点をマーカーm1、一致線を m1 - m2 とした（図-16参照、以下、m12変換と呼ぶ）。ここでは、m1を同様に一致点とし、一致線を m1 - m3として変換（以下、m13変換と呼ぶ）した結果について、両者を比較する。

m12変換と m13変換方法の比較として、変換後の各マーカー値の LiDAR-TS の差分をパターン p1-4、p5-8ごとに図-27に示す。同図より、差分はXYに比べ高さZ方向が大きく、また、LiDAR を側方右配置したパターン1~4（p1-4の○プロット：）の場合に大きくなり、m12変換では $\Delta Z > 0$ と LiDAR の方が高く、反対に m13変換では、 $\Delta Z < 0$ となり LiDAR 値が TS より小さくなっている。

m12と m13の変換の違いによる各マーカーの座標値差 $\Delta Y$ および $\Delta Z$ をパターン別に示す図-28をみると、LiDARより離れた位置のマーカーm3（△プロット）の差が大きく、方向別にみると高さ下図の $\Delta Z$ の差がパターン1、4、8の場合に大きくなっている。また、変換方法により座標値差が正負逆転する場合もあった。

## 5 まとめ

### 5.1 マーカー距離測定精度について

座標変換の基準点となるマーカーの距離測定精度（3章）では、下記について、確認した。

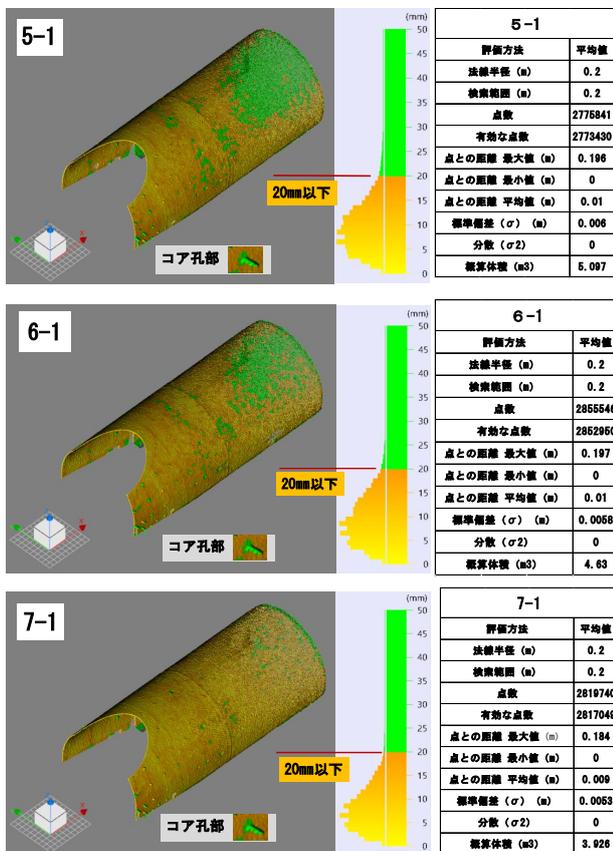


図-26 LiDAR と LS 点群との差分解析の結果例  
（マーカー配置パターン：5-1, 6-1, 7-1 の場合）

#### ○マーカー中心の検出方法の検証

LiDAR（3回測定）の結果の標準偏差  $\sigma$  およびマーカー面上の点群数に着目し、測定時間、測定距離、マーカー面角度の影響について調べた。 $\sigma$ は、マーカー面上の点群数が多いほど小さく、点群数は、測定距離、測定時間、マーカー面積・角度の影響を受けることが分かった（図-4~8参照）。

#### ○マーカー移動量

マーカー移動量については、LiDAR のマーカー中心検出値の移動前後の長さ と TS 視準値との比較で評価した。測定距離10m~40m 地点で、10mm~40mm移動させた場合、LiDAR-TS の移動量の差分は、測定距離30m では、移動量よりも差分が大きくなったが、測定距離20m 以下では、差分は X, Y 方向とも10mm以下となった（図-9~12参照）。

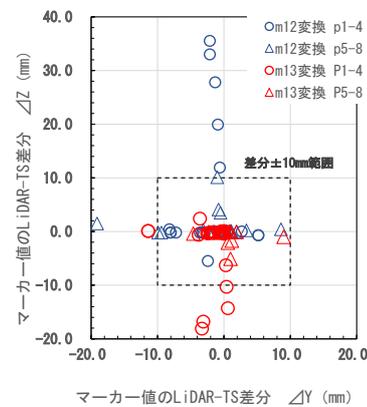


図-27 m12 変換と m13 変換の比較

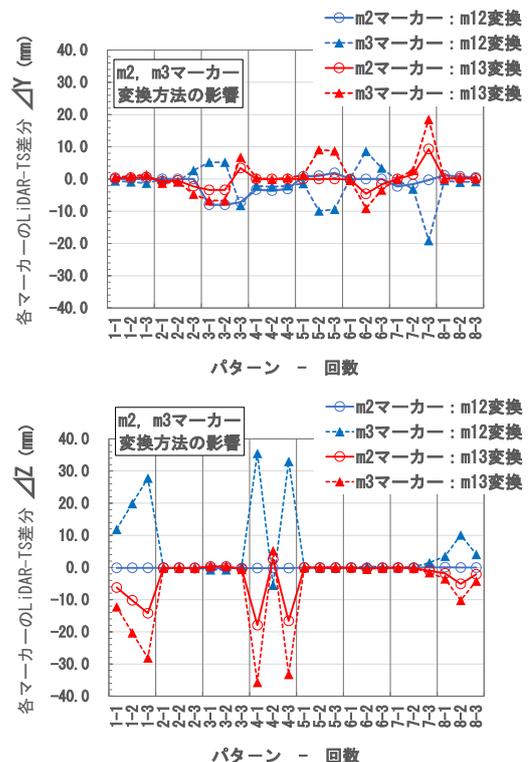


図-28 変換方法の違いによるパターン別 $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$

## 5.2 座標変換後の点群精度について

座標変換の基準値となる3カ所のマーカー (m1, m2, m3) の配置パターン (8パターン: 図-15参照) が座標変換に及ぼす影響について、座標変換後の点群精度 (4章) について検討した結果、以下のことが分かった。

### ○マーカー間距離の差

マーカー間距離 (3辺: m1-m2, m2-m3, m3-m1) の LiDAR-TS の差分は、各辺位置、配置パターン、測定回数 (1~3回) により、若干異なるが、(3辺の3回の) 各パターンの平均の差分は、LiDAR 中央配置のパターン5~8が比較的小さく、差分最大は15mm程度となった (図-17参照)。なお、本検討では、リジット変換としたため、マーカー間距離は、変換前後同じとなる (LiDAR, TS 各座標系の $\Delta m1-m2-m3$ の形状は、座標変換前後で変化はなし)。

### ○座標変換後のマーカー精度

座標変換が及ぼす影響について、座標変換後の点群精度を LiDAR 測定のマーカーおよびターゲットの中心検出値、模擬トンネル壁面点群と TS 視準測定値および LS 取得点群との差に着目して評価した。

LiDAR 中心検出値を TS 座標系に変換後のマーカー座標値の差分は、マーカー配置パターンにより異なり、パターン4の m3の場合に最も大きく36.6mmとなった。

(図-18参照: なお、リジット変換の一致とした m1は、差分0mmとなる)。また、差分は、LiDAR からの測定距離が大きい m3で大きくなる傾向を示した。

### ○座標変換後のトンネル内壁面の精度

座標変換後の模擬トンネル内空壁面の LiDAR と LS の差は、座標変換の影響を受け、トンネル内の測定位置により異なるが、マーカー配置パターンによっては、LiDAR 近傍15m程度以内の範囲で、差分20mm以下とすることは可能と考えられる (図-26)。

また、本検討のマーカー配置パターンでは、トンネル高さの差分が大きく、パターン8の3断面平均50cm程度の LS との差が認められた (図-25)。

### ○変換方法の影響

本検討で実施したリジット変換の一致線を変えた場

合、m12変換、と m13変換の差は明らかであり、高さ方向 Z の LiDAR-TS 差が大きく、差分の正負の逆転がみられた。

## 6 おわりに

任意点の変位 (時系列変化) や出来形 (設計値との差) などを求める場合や LiDAR の盛替えを行い、面的評価を行う場合には、比較対象を同一座標系に変換する必要がある。本検討における変換方法 (リジット変換) では変換前後の相対位置は同じとなるため、任意の2点間の距離は、変換の影響を受けないが、座標変換を行う場合は、基準点となる LiDAR、マーカーの配置位置、変換方法などが、精度 (本検討では、TS, LS 測定値との差分で評価) に影響を及ぼすため、LiDAR 性能、要求精度に応じて、測定対象の範囲、基準点配置位置、座標変換方法を設定する必要がある。

今後は、凹凸面の精度的な評価や、LiDAR 性能に応じた新たな用途について、さらに検討していきたいと考える。

### 参考文献

- 1) 小野知義, 前田幸男, 中田範俊, 山口和也, 黒田千歳: 3D 小型 LiDAR の用途拡大に向けた精度検証, 令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会, VI-1010, 2024.9
- 2) Livox Technology Company Limited, Livox Mid-360, <https://www.livoxtech.com/jp/mid-360> (2024/12/11 時点)
- 3) 研究型データサイエンティストのブログ, DBSCAN: 外れ値/ノイズを発見するための密度ベースクラスタリング, <https://wakame-msds.com/dbscan/> (2024/12/11 時点)
- 4) 医療のための Python プログラミング, Python で3点どうしの位置をあわせる 座標系を一致させる, <https://programming-surgeon.com/script/match-3points-mesh/> (2024/12/11 時点)
- 5) 福井コンピュータ株式会社, TREND-POINT(トレンドポイント)概要 | 土木 CAD-福井コンピュータ, <https://const.fukuicompu.co.jp/products/trendpoint/index.html> (2024/12/11 時点)