

# トンネル切羽版重機搭載レーザ計測システムの開発

## ～ICT 技術を使ったトンネル切羽掘削面のあたり計測検証～

株式会社フジタ  
株式会社フジタ  
ライカジオシステムズ株式会社

○中島 勇気  
浅沼 廉樹  
浮田 真樹

### 1. はじめに

山岳トンネルでは掘削発破後に発生する切羽面の設計面より内側に突出した整形箇所（以下あたり箇所）について、作業員（誘導員）が切羽直下に立入り、目視にてあたり箇所を確認しあたり取り作業の指示を出していた。しかし、発破直後の切羽は大変危険であり、安全性の確保が課題となっていた。

近年では、これらの切羽作業に 3D レーザスキャナを用いた計測が行われているが、精密機器かつ操作に専門的な知識が必要なことや、盛り替えに時間を要するなどの難点があった。さらに、トンネル坑内においては GNSS（全球測位衛星システム）が使えない為、GNSS を利用した簡易な計測ができない等の制約条件があり、簡易に自己位置を計測できる技術開発が望まれていた。

切羽版重機搭載レーザ計測システム（以下切羽版重機 LS-TS）は、2 年前に開発した「重機搭載レーザ計測システム（インバート版）」を切羽計測用に改良したものである。

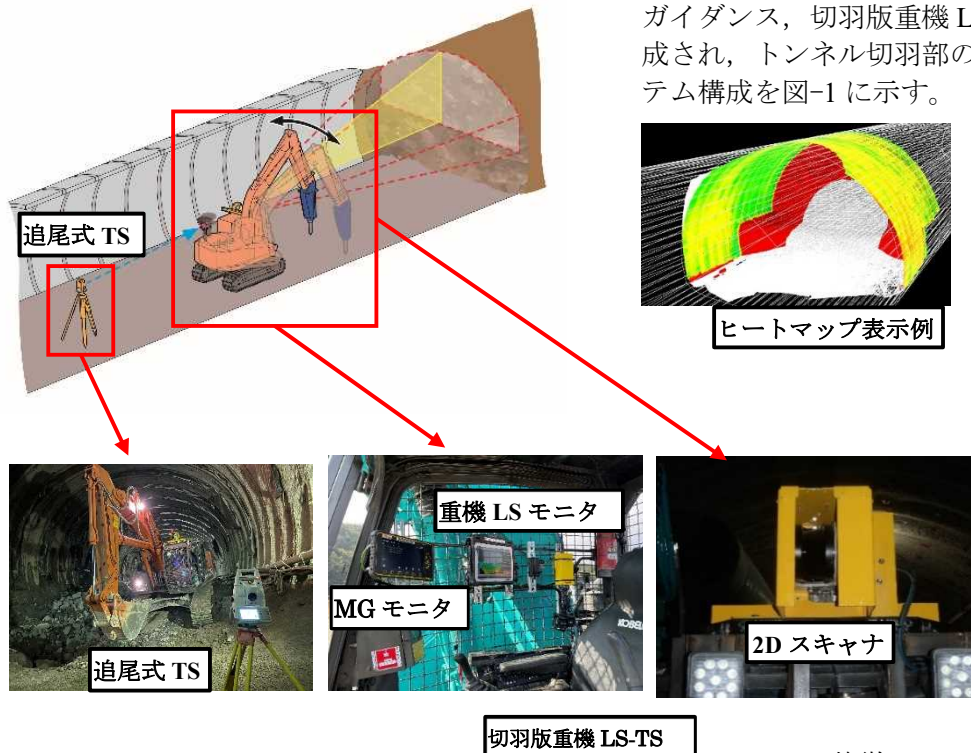
トンネル重機（ブレイカー）に計測ユニットを搭載して、切羽面を旋回しながらスキャニングすることで、取得した点群データと設計データの差分をヒートマップで出力し、重機オペレータが作業中に単独で切羽のあたり箇所を判定を行い効率的なあたり取りが可能となるシステムである。

本論文では、この技術を国土交通省四国地方整備局発注の羽ノ浦トンネル工事の切羽面掘削工にて、検証した結果を報告する。

### 2. システムの概要

#### 2.1 技術の概要

本システムは、トンネル内で運用可能なマシンガイダンス、切羽版重機 LS-TS、追尾式 TS で構成され、トンネル切羽部の 3D 計測を行う。システム構成を図-1 に示す。



#### 2.2 システムの特徴

図-1 切羽版重機 LS-TS 構成及び計測フロー

本システムの特徴を以下に示す。

- GNSS が利用できないトンネル空間においても、明かり工事と同様に ICT 施工が適用可能。
- 計測器に屋外用の安価で汎用性が高い 2D のレーザースキャナを用いて、重機を旋回させて計測することで容易に 3D データを取得。
- 重機に後付で搭載が可能。
- 重機が旋回スキャンする事で取得した掘削施工面の現状データを、3D 設計データと重ね合わせ、差分を色分けしたヒートマップを重機運転席の重機 LS モニタで計測結果閲覧可能。
- 計測から解析までを短時間で行い、測量作業が大幅に省力化され、生産性向上が可能。
- 切羽面への誘導員の立入が不要になり、安全性向上が可能。

### 3. 模擬トンネルでの実証実験

#### 3.1 トンネル内環境対策

切羽版重機 LS-TS をトンネル坑内で運用するにあたり、あたり取りで発生するガラ飛散による各センサの損傷が考えられた。そのため、専用の架台及び防護ケースを製作し、防護措置を施した。図-2 に実際に使用した防護ケースを示す。

また、各センサがあたり取り作業の振動で破損することも考えられたため、防振措置（2D スキャナにはヘリカル防振器、傾斜計には防振ゴムを使用）を施した。

図-2 に実際に使用した防護ケース・防振措置を示す。



図-2 防護ケース,防振措置実施状況

#### 3.2 模擬トンネル概要

実証実験を行う前に模擬トンネルで精度確認を行った。以下に模擬トンネルの概要を示す。

検証場所：埼玉県飯能市

株式会社フジタ 機械工場敷地内

検証期間：2021/3/2～2021/3/12

トンネル寸法：高さ 4.0[m]

幅 8.0[m]

#### 3.3 模擬トンネルでの精度確認

精度確認試験は、「地上移動体搭載型レーザースキャナを用いた出来形管理要領（土工編）（案）」（国土交通省）に準じた。模擬トンネル切羽面に 11 点の検証ターゲットを設置し、この検証点において、TS の計測値と、切羽版重機 LS-TS の計測値の差分が基準値±50mm 以内であることを確認した。また重機の姿勢は逆傾斜にした条件での計測結果を表-1 に示す。



図-3 模擬トンネルにおける精度確認状況

表-1 模擬トンネルでの精度検証結果

傾斜 [度]	旋回 速度 [度/秒]	旋回 角度	旋回 方向	差分			
				$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	
逆傾斜部 [-10.9]	1未満	小	右	-0.014	-0.041	0.032	
			左	-0.031	-0.040	0.031	
		大	右	-0.002	-0.038	0.002	
			左	-0.002	-0.034	-0.018	
		1	小	右	-0.034	-0.029	-0.012
				左	-0.013	-0.010	-0.025
	大		右	-0.018	-0.041	-0.003	
			左	0.010	-0.022	-0.001	
	2	小	右	-0.048	-0.037	-0.030	
			左	-0.001	-0.014	0.009	
		大	右	-0.015	-0.047	0.001	
			左	0.020	-0.022	0.008	

(単位[m], 出来形計測のため評価基準は $\pm 0.050$ [m]以内)

この結果より切羽版重機 LS-TS が要求精度を満たしていることを確認した。

#### 4 トンネル現場での実証実験

##### 4.1 実証実験現場の概要

工事名 : 令和元-4 年度横断道  
羽ノ浦トンネル工事  
工事場所 : 徳島県小松島市  
実施時期 : 1 回目 2022.1  
2 回目 2022.4  
発注者 : 国土交通省四国地方整備局

##### 4.2 現場実証時のキャリブレーションの見直し

実証実験開始前に重機を変更した為精度確認試験を実施した。

以下に精度確認試験の条件を示す。

###### <条件 1>

本システムは、追尾式 TS で位置と方位、2D スキャナで距離、傾斜計によるピッチ、ロールの補正を行い各センサのデータを演算し 3 次元座標を求める仕組みである (図-5 参照)。計測距離が長距離にまるとレーザースポット径の拡大、入射角が小さくなることから計測精度が低下する。要求精度の  $\pm 50\text{mm}$  に対して最大計測可能距離 10.0m 以内とする。

###### <条件 2>

本システムは、バックホウが走行せずに旋回する事により 3 次元座標が得られる (図-4 参照)。出来形計測に必要な点群密度 ( $0.01\text{m}^2$  に 1 点) に対して、旋回速度は 4 度/秒以内とする。

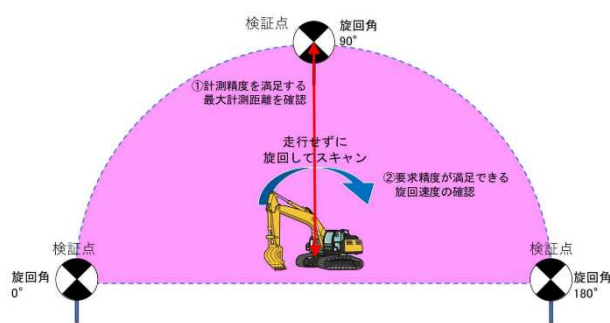


図-4 キャリブレーション確認範囲

現場実証時の精度確認において、上記キャリブレーション確認範囲による試験を実施したところ当初は基準値を満足する精度が得られない結果となった。

この原因を調査したところ、重機旋回時の左右区分におけるデータ数値の差異が大きいことから、重機の位置計測を行う追尾式 TS の応答速度遅延が重機旋回の左右差で影響が発生していることが判明した (図-6 参照)。

そこでセンサ類を後付けで設置した後に行うキャリブレーション時に行うパラメータの設定に左右旋回時の個別のパラメータ数値を入力できるようにアルゴリズムを修正した。本改良にもとづく精度確認試験の結果を表-3 に示す。この結果よりパラメータ設定で TS 応答速度遅延の問題が解消できることを実証した。

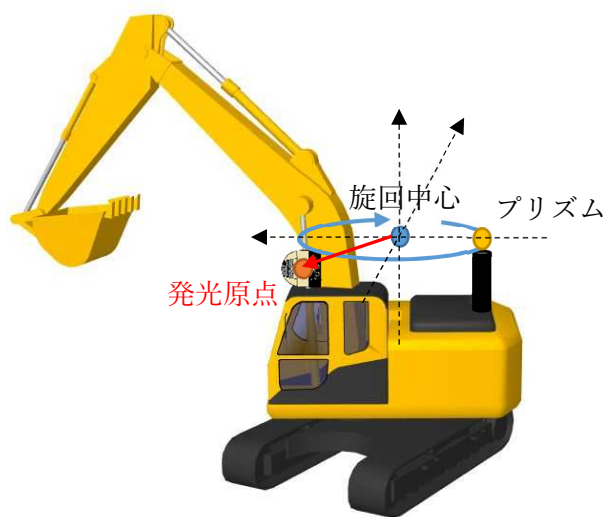


図-5 重機 LS-TS における重機姿勢の求め方

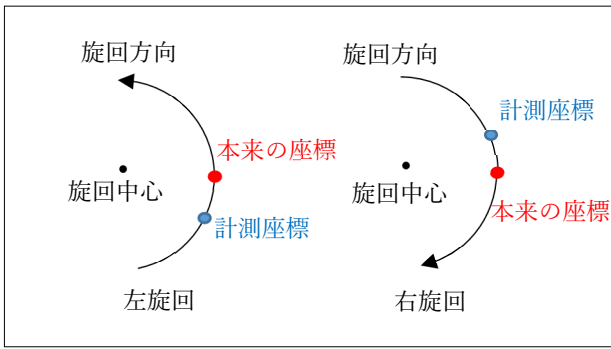


図-6 TS の応答速度の遅延

表-3 トンネル坑内坑口部での検証結果

計測位置 [度]	旋回 速度 [度/秒]	旋回 方向	差分の平均		
			$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
坑口部 [0]	1	左	-0.019	-0.011	-0.009
		右	0.027	-0.002	0.003
	2	左	0.002	-0.009	-0.005
		右	-0.007	-0.021	0.026
4	左	0.028	-0.002	0.014	
	右	-0.008	-0.016	0.013	

(単位[m], 出来形計測のため評価基準は $\pm 0.050$ [m]以内)

#### 4.3 トンネル切羽での精度検証結果

前述キャリブレーションの見直しにより高精度が確認されたため、切羽計測での精度確認試験を実施した結果を表-4 に示す。

表-4 トンネル切羽部での検証結果

計測位置 [度]	旋回 速度 [度/秒]	旋回 方向	差分の平均		
			$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
傾斜部 [6]	1	左	-0.013	0.044	-0.018
		右	-0.040	-0.006	-0.011
	2	左	-0.025	0.039	-0.020
		右	-0.021	0.016	-0.005
	4	左	-0.045	0.014	-0.009
		右	-0.003	0.042	0.007

(単位[m], 出来形計測のため評価基準は $\pm 0.050$ [m]以内)

この結果よりすべての計測値が $\pm 50$ mm 以内に収まり切羽版重機 LS-TS の精度確認を行うことができた。

#### 5. 作業時間の短縮化

作業員（誘導員）が切羽直下に立入り、目視にてあたり箇所を確認し作業指示を出していた従来の確認方法から、重機オペレータが自ら作業しながら出来形の良否を確認できるようになり、整形作業が約 22%短縮された（表-5 参照）。

表-5 作業時間の比較

作業内容	従来方法	切羽版重機 LS-TS
あたり取り作業 [min]	30.0	30.0
余掘り確認 [min]	15.0	5.0
合計時間 [min]	45.0	35.0

#### 6. 今後の課題

##### 6.1 精度の向上

今回の実証実験では「国土交通省 地上移動体搭載型レーザスキャナを用いた出来形管理要領（土工編）（案）」に準拠して精度確認を行ったが、「地上型（定置式）レーザスキャナを用いた出来形管理」では $\pm 5$ mm の測定精度が求められるため、さらなる精度向上が必要である。そのための 1 例として検証点を改良する事が挙げられる。これは 2D スキャナから放たれるレーザ光が検証点に反射して、受光器に返ってくる具合が、センサ認識としての質に影響を及ぼしている可能性がある。そのため、異なる旋回方向や旋回速度でも同様に反射レーザ光を受光できる検証点の開発が必要である

##### 6.2 出来形帳票システム

今後はヒートマップ表示を行うソフトと連動して余掘り量数値や覆工コンクリート巻厚確認のための出来形帳票として出力できるソフトの開発も視野に入れて検証・開発を行う（図-7 参照）。

重機LS-TS 出来形表示  
出来形帳票 イメージ図-1

##### ①断面図

##### 表示例-1

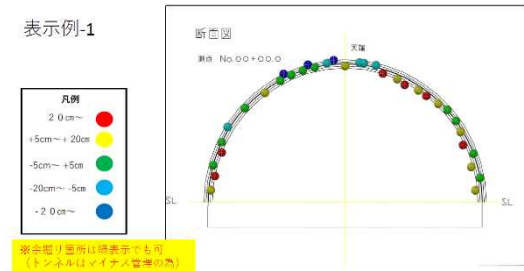


図-7 ヒートマップ表示例

#### 7. おわりに

切羽版重機 LS-TS によるあたり箇所の 3D 計測とヒートマップ化を実現することで、従来の誘導員による目視確認と比較して誘導員が不要となるため安全性の向上を図ることが可能である。

また、あたり箇所の判定を重機オペレータ単独で行えるため省人化による生産性向上を図ることが可能である。

本技術が建設現場への ICT 導入に対する更なる普及促進につながれば幸いである。

本技術の開発と現場試行にあたり、多岐にわたりご指導を賜りました関係者各位に深く感謝を申し上げます。