

# レーザースキャナによるトンネル出来形管理技術 トンネル出来形管理システム「出来形マイスター」の活用

須佐見 朱加・京 免 継彦

近年、建設業においても就業者数の減少が顕著であり、生産性向上を目的とした取り組みが盛んに行われている。このような背景から、山岳トンネル工事における出来形管理手法のひとつとして、レーザースキャナの活用が作業の効率化と安全性向上の両面から期待されている。今回、施工中の現場においてレーザースキャナ計測を実施し、得られた計測データから覆工の厚さ判定や打設数量の推定、出来形計測ができるシステム「出来形マイスター」を導入した。本稿では、このシステムを道路トンネルに適用した事例について紹介する。

キーワード：山岳トンネル、レーザースキャナ、3次元計測、出来形管理、情報化施工

## 1. はじめに

建設業の就業者数は、減少の一途をたどっている<sup>1)</sup>。このような状況の中、いかに限られた時間内で高い成果をあげるかが喫緊の課題になっている。

たとえば、トンネル工事はここ50年で生産性が著しく向上<sup>2,3)</sup>した工種の一つである。これは、人力による「矢板工法」から機械施工による「NATM (New Austrian Tunneling Method)」に移行したためであり、今後もより一層、機械化や自動化<sup>4)</sup>が進むと考えられる。一方、現行の出来形管理はある管理断面を対象として巻尺やレベルを用いた手作業による計測が長年用いられている。天端部の計測では高所作業車を用いる必要があり、計測毎の移動に手間を要するだけでなく、安全対策を講じる必要がある。また、覆工コンクリートの打設数量を的確に算出するには、セントル（覆工型枠）のすべての検査窓から吹付けコンクリート面とセントルまでの距離を計測する必要があり、狭隘なセントル内での計測は作業効率が悪く、作業者の負担も大きいことが課題となっていた（図-1）。

そこで今回、施工中のトンネル現場においてレーザースキャナ計測を実施し、3次元出来形管理システム（以下、本システム）を適用した。本稿では、本システムと現行の出来形管理を比較することで安全性や作業効率に与える効果を検討するとともに、施工現場での普及に向け、現状で残る課題とその解決策について報告する。



図-1 セントル内での計測

## 2. 実施工を対象としたレーザースキャナによるトンネルの出来形管理

### (1) 概要

レーザースキャナによるトンネルの出来形管理<sup>5)</sup>（以下、LS管理）は、トンネル壁面をレーザースキャナで計測し、3次元の設計モデルと比較することで構造物全体の出来形を確認するとともに、計測作業の効率化や安全性を図るものである。今回、700m程度の道路トンネルにおいてLS管理を実施した。

### (2) 計測機器および計測方法

計測機器は、1秒間に約12万点の点群を取得し、器械点を中心に鉛直方向に270°、水平方向に360°の範囲を計測することができるTOPCON社製のGLS-2000を使用した。

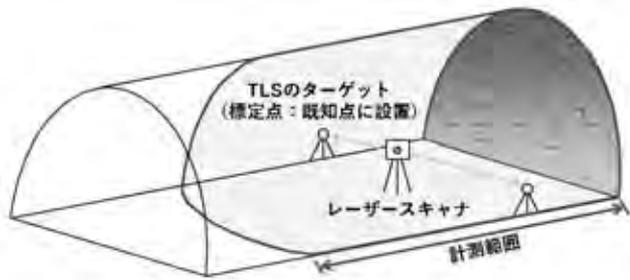


図-2 計測概略図

計測の概略を図-2に示す。まず最初に、レーザーキャナをトンネルの中心付近に設置する。計測は見通しが利く範囲のみ有効であるため、レーザー照射の障害となる資機材は事前に撤去する必要がある。次に、標定点（レーザーキャナのターゲット）を坑内基準点に設置する。その後、標定点を視準し、後方交会により器械設置位置を算出する。この作業は、計測した点群の座標変換や合成をする際に必要となる。そして、トンネル壁面の形状を計測する。この一連の計測を、吹付けコンクリート施工後（打設前計測）と覆工コンクリート打設後（打設後計測）で実施する。

計測条件は、表-1に示すとおりである。NATMは、通常、吹付けコンクリート面の表面が凹凸である一方、覆工コンクリートは平滑な仕上がりとなる。そのため、打設後計測は打設前計測に比べ、計測密度を粗くし、計測間隔を長くすることで計測時間の短縮を図った。

表-1 計測条件

計測時期	計測密度	計測間隔	計測時間
吹付けコンクリート 施工後 (打設前計測)	6.3 mm/10 m	30 m	7分
覆工コンクリート 打設後 (打設後計測)	12.5 mm/10 m	40 m	2分

(3) 計測データの処理方法

処理フローを図-3に示す。

本システムでは、① トンネルの設計断面データ、② トンネルの中心線形データ、③ 現場座標に変換した計測データの3種類を必要とする。計測データには、測定対象面～レーザーキャナ間においてレーザー光を遮断する支障物が含まれているため、トンネル壁面のみ点群を抽出する。その後、ポリゴンメッシュ化することで3次元モデルを作成する。ここで、覆工コンクリート打設前後の3次元モデルを打設前モデル、打設後モデル、さらに、トンネル中心線形と設計断面から構成されたものを設計モデルと定義する。

覆工コンクリート打設前の厚さは、打設前モデルと設計モデル、打設後の覆工厚さは打設前・後のモデルとの差から算出する。その値をブロック毎に色分けしたヒートマップで表示することで覆工厚さの判定を行う。また、打設前・後のモデル上で任意点を指定する

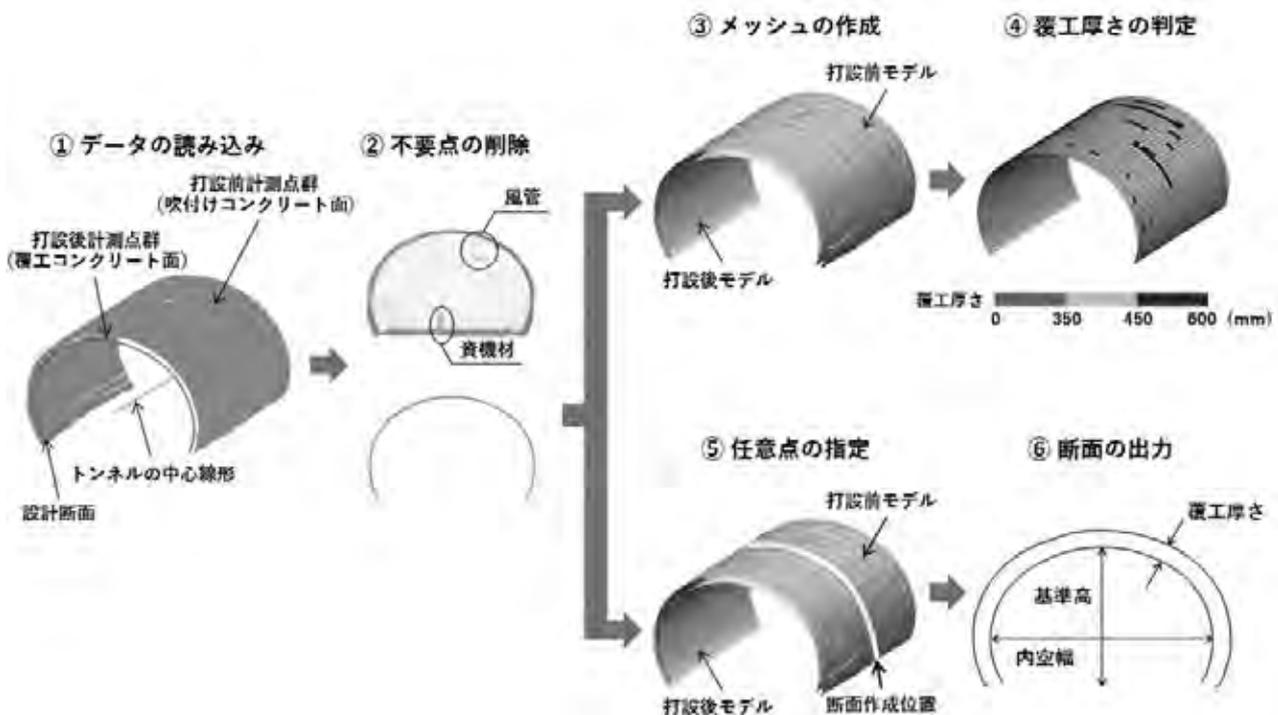


図-3 計測データの処理フロー

ことで断面を作成し、CAD ファイルに出力することで PC 上で出来形計測を行う。

(4) 処理結果

図-4 に処理結果例として、打設前計測と打設後計測の差から1打設長 (=10.5 m) の覆工厚さを評価した3D 図および展開図を示す。ヒートマップの色分けは、設計値の覆工厚さに満たない場合は赤色、それ以外は値によって緑または青色と定義する。このようにヒートマップ表示することで、余掘りが多い箇所(青色)と覆工厚さの不足箇所(赤色)を視覚的に把握することができる。

また、ヒートマップのブロック毎の値を積算することで体積を算出し、覆工コンクリート打設前に必要なコンクリート量を推定することができる。そこで、箱抜きがなく、打設長内で断面種別が変化しない20区間において、打設したコンクリート量と解析値の比較を行った。その結果を図-5 に示す。解析値は、打設したコンクリートに対して全体的に小さい値を示し、その誤差は3.2%である。これは、① コンクリートの圧送管やポンプ車のホッパー等に残ったコンク

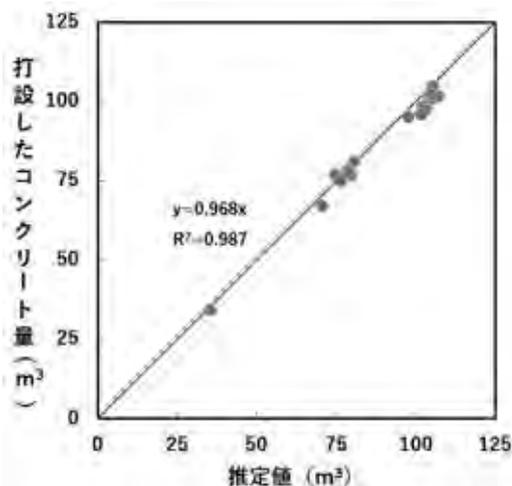


図-5 処理結果

表-2 実測値とCAD計測値の誤差

	誤差
内空幅	± 4.4 mm
内空高さ	± 4.8 mm

リート、② ヒートマップ作成時の値の採用方法(最小値、最大値、平均値等)が影響している可能性があり、今後より詳細な検討を行う必要がある。

表-2 は、ある断面において実測値とCADファイルとして断面を出力し、PC上で内空計測した結果である。内空幅・高さともに±5mm以内であり、LSで計測・処理を行っても現行の出来形管理と同等の精度を確保できているといえる。

3. LS 管理に関する一考察

表-3 は、実施工を対象としたLS管理で得られた結果より、現状と課題、改善策をまとめたものである。

品質面において、現行管理はあらかじめ決められた箇所での単点計測であったため、それ以外の出来形を知るすべはなかった。一方、LS管理では連続した3次元の面形状を取得し、3次元処理を行うことで、施工箇所全体の出来形を一目で把握することが可能となる。そのため、これまで以上の品質確保を期待できる。今後は、この施工時の計測データを維持管理にどのように生かすかが課題である。

精度面について、LS管理は現行と同等の計測精度を確保しているものの、計測およびデータの取り扱いには注意を払う必要がある。

まず、図-4の処理結果において、覆工厚さ不足である赤色が表示されたのは、箱抜きの影響である。通常、箱抜き工は切羽掘削とは別に後から施工するた

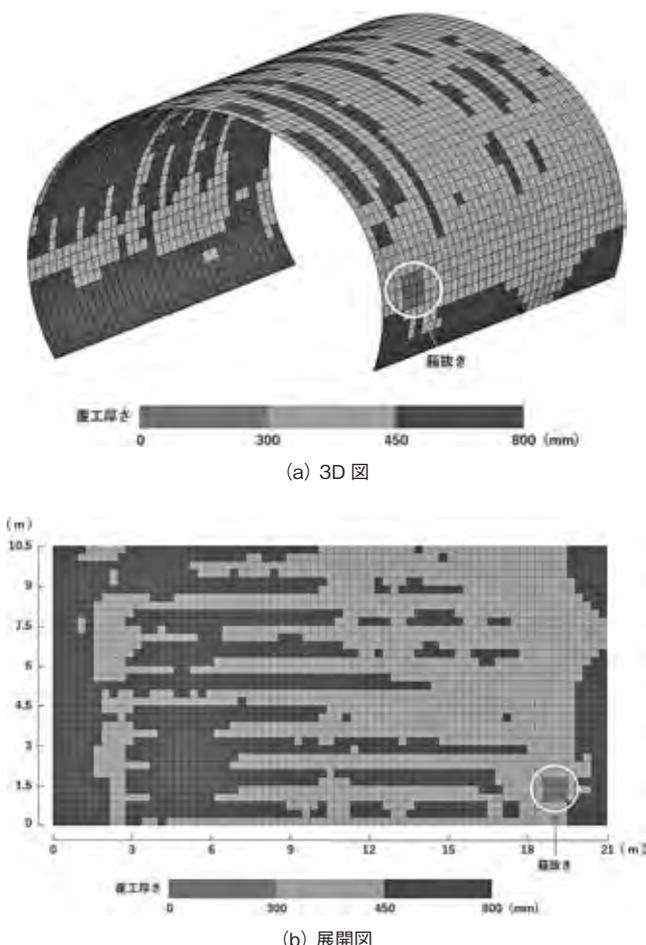


図-4 処理結果の一例 (1 ブロック= 30 cm 四方)

表—3 LS管理の課題と改善策

	現状	課題	改善策
品質	・面的に管理可能 ・一目で出来形を把握	・維持管理への展開	—
精度	・現行の出来形計測と同等の精度を確保	・箱抜き工の取り扱い ・支障物による計測データの欠損	・局所的な計測と合成 ・異なる地点での計測 ・欠損の許容範囲決め
作業	・高所作業の不要化（安全性の向上） ・計測～処理を1人で作業可能 ・確認作業の省力化	・さらなる作業の効率化	・計測機器の選定 ・処理手順の確立

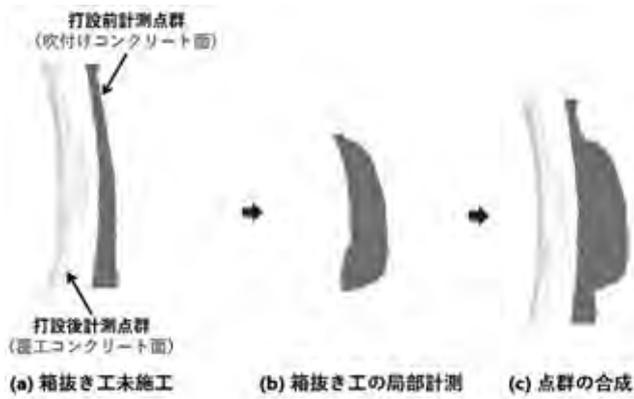
め、切羽近傍で計測した場合、未施工であることが多い。その段階で計測したデータと打設後計測のデータを重ね合わせると、あたかも覆工厚さが不足しているかのような判定となる。それを防ぐためにも箱抜き工施工後に再計測の実施、あるいは、箱抜き工のみを局部計測し、未施工時の計測データと点群を合成する手順が必要である（図—6）。

また、計測は支障物がない状態で実施することが好ましいが、吹付けコンクリート施工直後以外は少なからず支障物が存在し、その部分が欠損した状態になることが多い。図—7は、風管設備により欠損した計測データの一部である。このような場合、異なる地点から複数回計測を行うことで不可視部をなくすことも可能であるが、取得点群の増加に伴い処理時間も長く

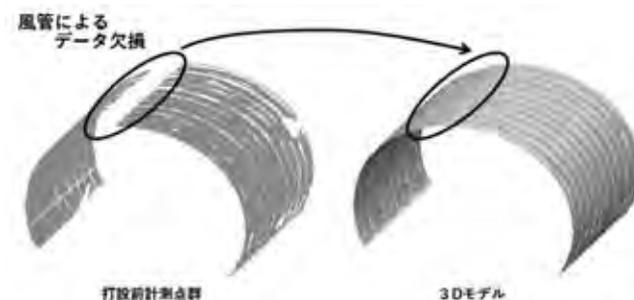
なるといったデメリットもある。本システムでは、欠損部周辺の点群から設計モデルを近似させ、補完する処理を行っている。当然のことながら、補完数範囲が大きくなるほど処理結果の信頼性が低下する。そのため、たとえば UAV 搭載型レーザースキャナを用いた公共測量マニュアル（案）<sup>6)</sup> のように、点群が取得できないメッシュの割合を欠測率と定め、メッシュの大きさによって欠測率の許容値を決めることが望ましいと考える。

作業面において、作業者は足場の設置や高所作業車を必要とせず、非接触で計測を行えることから、現行の出来形管理に比べ安全性の向上を図ることができる。また、計測結果を「見える化」することで、一目で出来形を把握することができ、確認作業の省力化につながる。

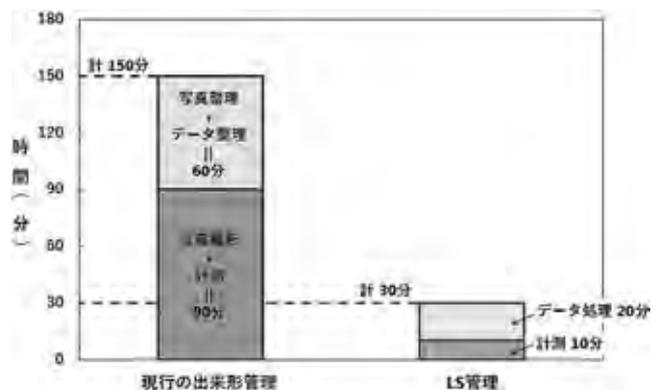
現場担当者のヒアリングに基づく作業時間の比較を図—8に、LS管理の詳細を表—4にそれぞれ示す。図—8より、現行管理では計測とそれに伴う写真撮影に多くの時間を費やしていることがわかる。今回実施したLS管理では、施工箇所全体の形状を点群として把握しており、どの断面においても出来形を確認できる場合のみ写真撮影を省略可能と仮定すると、現行の出来形管理と比較して2割程度の時間で済む。また、若手職員やベテラン職員といった各職員の作業時



図—6 箱抜き工の点群処理方法の一例



図—7 計測点群欠損部の補完



図—8 作業時間の比較 (1打設長あたり)

表-4 作業時間の詳細 (LS 管理)

計測時間 (器械設置時間含む)	
打設前計測	6.7 分 /1 打設長* (20分で3打設長分)
打設前計測	3.75 分 /1 打設長 (15分で4打設長分)
	10.45 分 /1 打設長

処理時間	
打設前計測	
点群作成	5 分 /1 打設長 (15分で3打設長分)
ヒートマップ	5 分 /1 打設長
打設後計測	
点群作成	3.75 分 /1 打設長 (15分で4打設長分)
ヒートマップ	5 分 /1 打設長
出来形帳票出力	1 分 /1 打設長
	19.75 分 /1 打設長

※ 1 打設長 = 10.5 m

間のバラツキを縮小し、生産性向上に寄与することが期待される。

#### 4. おわりに

施工中のトンネル現場において LS 管理を実施し、現行の出来形管理と比較したところ、以下の知見が得られた。

- (1) レーザースキャナで計測したトンネル壁面の点群は、面的に評価することで構造物全体を「見える化」するだけでなく、確認作業の省力化にもつながる。
- (2) LS 管理は非接触で計測することができ、1 回の

据付けで広範囲を高密度に計測することから、従来、必要であった足場や高所での作業が不要となり、作業員の安全性向上につながる。

- (3) 今回実施した LS 管理では、従来の巻尺やレベルによる出来形管理と比較しても同等の計測精度を保ちつつ、作業時間を大幅に削減し、生産性向上へ寄与することがわかった。

JICMA

#### 《参考文献》

- 1) (社)日本建設連合会：建設業ハンドブック 2018, pp.18, 2018.
- 2) 廣田良輔：新幹線のインフラコストと建設技術の進展, 土木学会, 土木学会第 83 回通常総会特別講演資料, 1997.
- 3) 金澤博：新幹線工事における山岳トンネルの変遷, トンネルと地下, Vol. 42, No. 3, pp.5-6, 2011.
- 4) 日経コンストラクション：山岳トンネル工事の自動化は可能か?, pp.52-53, 2018.
- 5) 国土交通省：レーザースキャナを用いた出来形管理の試行要領 (案) (トンネル編), 2017.
- 6) 国土交通省国土地理院：UAV 搭載型レーザースキャナを用いた公共測量マニュアル (案), pp.17, 2018.

#### 【筆者紹介】

須佐見 朱加 (すさみ あやか)  
佐藤工業㈱  
事業支援センター ICT 推進部



京免 継彦 (きょうめん つぐひこ)  
佐藤工業㈱  
事業支援センター ICT 推進部  
部長

