

# トンネル計測点群評価機能の開発

## Development of Inspection System for Tunnel Point Cloud

金井 仁志

**要約** 国土交通省の推進する i-Construction の取り組みにおいて、3次元スキャナで取得した計測点群の活用は重要な要素のひとつである。日本ユニシス・エクセリョーションズは、i-Construction 対応を進める佐藤工業株式会社と共同で、トンネル建設中に取得した計測点群の形状評価を行う機能を開発し導入した。本機能は、打設コンクリート量の見積もりと、打設したコンクリートの厚み分布評価を CAD システム上で実現するものであり、本機能を活用することで、トンネル施工のコスト削減や、コンクリートの厚みを安全かつ効率的に評価できるようになることが期待できる。本機能は、導入後佐藤工業からも高い評価を得ており、今後も機能追加や改善を進めることが予定されている。

**Abstract** Using laser scanned point cloud is one of the important factors in “i-Construction” promoted by Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. UEL Corporation has developed an inspection system for laser scanned point cloud of tunnel acquired during construction, in collaboration with SATO KOGYO CO., LTD., which is promoting “i-Construction”. This system estimates the amount of concrete and evaluates the thickness of concrete on the CAD system. With this system, it is expected to achieve cost reduction of tunnel construction and safe and efficient evaluation of the thickness of concrete. This system has been praised by SATO KOGYO and is planned to be improved continually.

### 1. はじめに

i-Construction は、国土交通省が2016年から推進している生産性革命プロジェクトのひとつで、建設現場の生産性向上を目的に、調査から測量、設計、施工、検査、維持管理まですべてのプロセスで ICT を活用することを進める取り組みである<sup>[1]</sup>。この取り組みの中でも、CIM (Construction Information Modeling/Management)<sup>[2]</sup>に含まれるような建設現場の3次元モデル化は特に重要な要素であるため、モデル化のベースとなる3次元計測点群の活用が盛んに進められている。

このような背景のもと日本ユニシス・エクセリョーションズ株式会社は、長年の3次元 CAD 開発で培った形状処理技術を応用し、i-Construction 対応を進めている佐藤工業株式会社（以下、佐藤工業）と共同で、トンネル計測点群評価機能（以下、本機能）を開発した。本機能は、建設中のトンネル内部を3次元レーザースキャナで計測して得られた点群を用いて、トンネルの覆工（内面を覆うようにコンクリートを打設すること）に関する以下の評価を3次元 CAD システム上で実現するものである。

- 1) 覆工に必要なコンクリートの体積を見積もる。
- 2) コンクリート覆工後にその厚み分布を評価する。

特に2)に関して、従来の覆工コンクリートの厚み検査は、作業者が高所作業車を使ってト

ンネル内面に近づき、コンクリート打設の時点であらかじめ数箇所開けておいた穴にメジャーなどを差し込むという方法で行われていた。それに対して本機能を利用することで、危険を伴う高所での煩雑な検査作業を減らし、安全かつ効率的にコンクリートの厚みを評価することができるようになる。さらにトンネル内面の任意の位置で厚みを確認できるため、検査の信頼性を高めることができる。本機能は、佐藤工業からも高い評価を得ており、継続して機能強化することが予定されている。

本稿では、2章でトンネル施工・検査の概要と課題を説明し、3章で本機能の処理概要を紹介する。4章で検証結果を報告し、5章で今後の展望を述べる。

## 2. トンネル施工概要と形状評価における課題

本章では、トンネル施工・検査の概要と、信頼のおける評価結果を得る際に解決すべき課題を、簡単な用語説明を含めて説明する。

### 2.1 トンネル施工方法の概要

山地でのトンネル工事<sup>\*1</sup>は、大きく分けて掘削作業（トンネルを掘る作業）、支保工作业（掘削後に壁が崩れるのを防ぎ、補強する作業）、コンクリート覆工作业（トンネル内面を覆うようにコンクリートを打設する作業）の三つの工程からなる<sup>[3]</sup>。特に本機能と関連があるコンクリート覆工作业について、さらに詳しく説明する。

コンクリート覆工作业では、まず支保工作业で吹き付けコンクリートや鉄筋棒などにより補強された状態のトンネル内面（図1左、吹き付け面と呼ぶ）に対して、湧水による劣化を防ぐための防水シートを密着させる。次にセントルと呼ばれる専用のコンクリート枠型をコンクリート打設区間に設置し、吹き付け面とセントルの間にコンクリートを流し込み、乾燥させる（図1右、打設後面と呼ぶ）。これらの作業を、セントルを通常約10mごとにスライドさせながら順番に行い、トンネル全体のコンクリート覆工作业を完了する。



図1 左：吹き付け面，右：打設後面（佐藤工業提供）

### 2.2 トンネル形状の設計データ

コンクリート覆工の完了したトンネル内面（打設後面）の設計上の形状は、トンネルの円弧状の断面線形状（以下、覆工断面）をトンネルの中心線形状（以下、トンネル線形）に沿って掃引した形状として定義される。

覆工断面は2次元図面上の曲線で定義される（図2左）。掘削する区間の地質や、敷設する道路の制約（非常駐車帯、管理用通路などの設置）により、一般にひとつのトンネルでも複数

の断面を使用する。

トンネル線形は、位置を3次元座標で表した点列（折れ線）により定義される（図2右）。この点列は、国土地理院によって定められた平面直角座標系<sup>[4]</sup>で表現されている。この座標系は、日本列島に設定された19個の区域でそれぞれ別の投影法を適用する座標系であり、土木分野で広く利用されている。

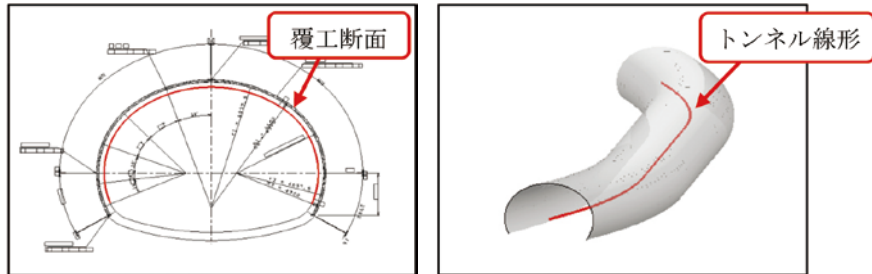


図2 左：覆工断面図面の例，右：トンネル線形の例（佐藤工業提供）

### 2.3 トンネル計測点群を利用した形状評価と課題

佐藤工業では、i-Construction 対応の一環として、トンネル施工の際に吹き付け面と打設後面の表面をそれぞれ3次元スキャナで計測し、得られた3次元点群を施工管理に活用することを進めている。これらの計測点群による形状評価として、以下の二つの評価シナリオを実現したいという要求があった。

#### シナリオ 1) 打設前検査

コンクリート打設の前に、吹き付け面の計測点群と設計データを比較して、覆工に必要なコンクリートの体積を見積もりたい。コンクリート体積を適切に見積もることができれば、手配するコンクリート量や、それを運搬するトラック、使用する重機や人員を最適化することができ、コストの大幅な削減につながる。

なお、コンクリートの厚みを確保するために、規定よりも広く掘削を行うことが多いため、トンネルの図面のみからコンクリート量を見積もるだけでは不十分である。実際にコンクリートを打設する直前の形状である吹き付け面形状から体積を推定することで、見積もりの精度を上げることができる。

#### シナリオ 2) 打設後検査

コンクリート打設の後に、吹き付け面の計測点群と打設後面の計測点群を比較して、打設したコンクリートの厚みが規定値を満たしているか評価したい。従来の検査方法は、作業員が高所作業車に乗って打設後面に近づき、コンクリート打設の時点であらかじめ数箇所開けておいた穴にメジャーなどを差し込んで厚みを読み取るものだった（図3）。打設前後に計測した3次元点群による厚み評価がシステム上でできれば、危険を伴う高所での煩雑な作業を減らすことができ、さらにコンクリートの厚みを任意の位置で確認できるため、検査の信頼性を上げることができる。

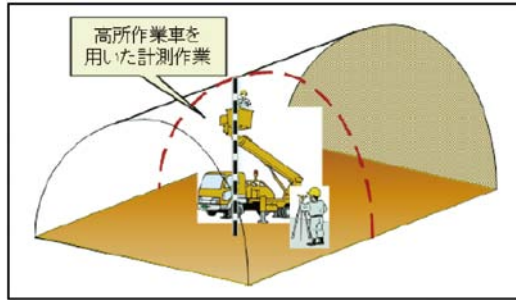


図3 従来の覆工コンクリート厚み検査<sup>[5]</sup>

打設前検査、打設後検査とも計測点群により面的に分布する値（厚み）を評価することに加え、評価した形状の任意の位置で断面を取得したいという要望があったため、本機能では計測点群をポリゴンメッシュ化<sup>\*2</sup>した上で評価することを要件とした。しかし一般の点群ポリゴンメッシュ化技術の本機能に適用する場合、以下のような課題があることがわかった。

- 計測点群のノイズに由来する小さな穴や折り返し、表裏反転など、局所的な形状不良が起きやすい。（典型的な計測点群の状況を図4に示す。）
- 入力点群に大きな欠損（本機能の場合、レーザー光が重機や換気用ダクトに遮られ点群を取得できなかった部分）があると、原理的にそのまま欠損のあるポリゴンメッシュになる。（もしくは、トンネル形状を再現できない。）

図5に、ある市販ソフトウェアで吹き付け面点群をポリゴンメッシュ化した結果を示す。上記課題が多く発生しており、また大きな欠損があるため、今回の形状評価に耐えない品質であることがわかる。

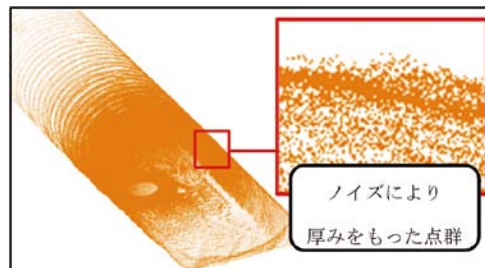


図4 計測点群の例

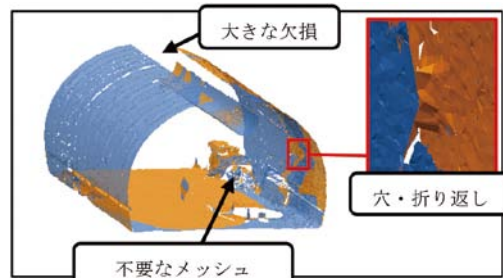


図5 ある市販ソフトウェアによるメッシュ化結果

本機能ではこれらの課題を解決するため、それぞれの計測点群のメッシュ化で、トンネルの設計データを利用する方法を採用した。すなわち、トンネルの設計データから大きく外れるような点はノイズ点であるとしてメッシュ化対象から除外し、設計データをもとに生成したCAD形状相当の面を計測点群に押し付けるような変形を施すことでメッシュを作成する。次章では、順を追ってこれらの機能の詳細を説明する。

### 3. 本機能の処理概要

本章では本機能の処理概要を説明する。一連の操作の流れを図6に示す。本機能では、まずトンネルの設計データと3次元計測点群を読み込む(3.1節)。次に、計測点群内の評価に必要な点を削除する(3.2節)。そしてトンネル内面の任意の点での厚み評価のため、それぞれの点群をポリゴンメッシュ化し(3.3節)、その結果を利用して打設前検査、打設後検査を行う(3.4節)。以降の節では、各機能について詳細に説明する。

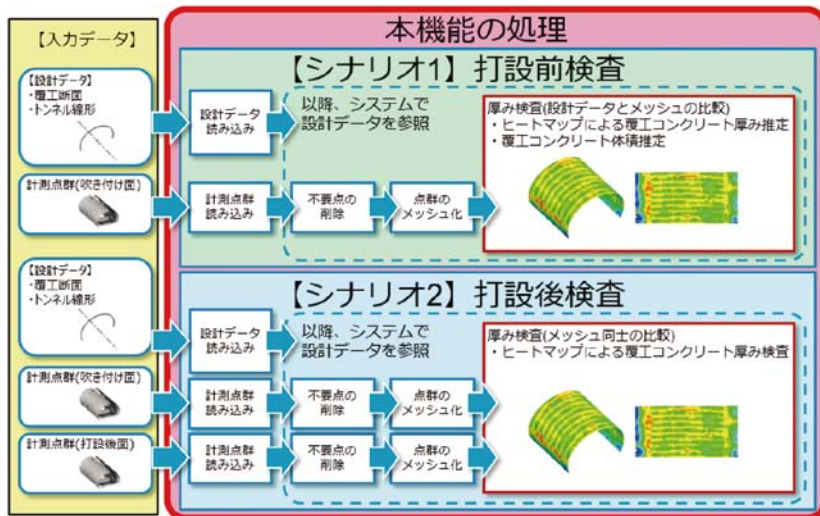


図6 本機能の流れ

#### 3.1 設計データと計測点群の読み込み

はじめに、トンネルの設計データとして覆工断面(2次元図面)、評価区間のトンネル線形にあたる線分を読み込み、評価対象区間のトンネル形状を定義する。合わせて、吹き付け面の計測点群と打設後面の計測点群(打設後検査の場合)を読み込む。これらの入力データを読み込んだ結果を図7に示す。

なお、3次元スキャナが出力する計測点群の座標系はX方向が東、Y方向が北(数学座標系)、一方トンネル線形の座標系(平面直角座標系)はX方向が北、Y方向が東となっているため、データ読み込みの時点でこの違いを吸収する。



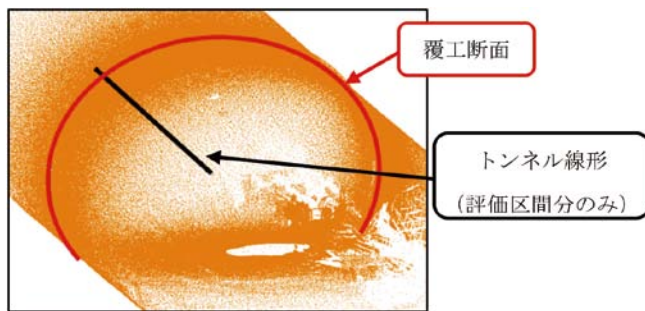


図7 設計データと吹き付け面計測点群

### 3.2 計測点群内の不要点除去

計測点群は3次元スキャナの視界すべての点を含むため、検査に不要な点が多く存在する。ここでは、それらの不要点を半自動で削除する。ここで不要な点とは、例えば工事用の重機、換気用のダクト（風管）、照明といったトンネル内面以外の物体の表面点群などを指す。また、トンネル内面上の点であっても、評価範囲外の点群や、地面の点群はコンクリートの評価には不要である。

不要点削除を効率的に行うため、本機能ではトンネルの設計データを参照して点を残す範囲を提示し、ユーザがそれを調整する方式をとった（図8）。ここでは操作性向上のため、以下の工夫を加えた。

- 視点を自動的にトンネル線形に沿った方向にする。
- 吹き付け面の計測点群と打設後面の計測点群で、それぞれ別の初期範囲を提示する。

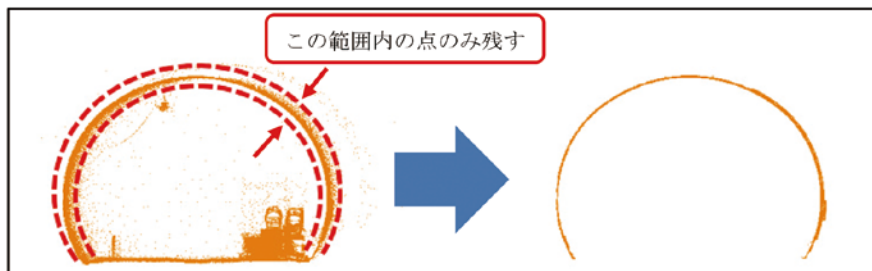


図8 不要点除去イメージ

### 3.3 計測点群のメッシュ化

打設前検査、打設後検査とも、計測点群を面的に評価するため、計測点群をメッシュ化する。一般的な点群のメッシュ化技術としては、Poisson surface reconstruction<sup>[6]</sup>、MPU<sup>[7]</sup>をはじめ多数の方法が提案されている。本機能における点群のメッシュ化にもこれらの技術を適用することができるが、大規模な計測点群のメッシュ化は計算に時間がかかる上、大きな欠損部分がある場合には原理的にトンネル形状を再現できないという課題があることがわかった。

そこで本機能では、トンネルの設計データがあることを利用して、高速で頑健な手法を採用した。すなわち、まず設計データによって定義されるトンネル内面形状の論理的なメッシュを作成し、それをメッシュ化対象の計測点群に押し付けるように変形して出力形状とする（図9）。

このように設計データをテンプレート形状として活用する方法は、一般的な点群メッシュ化技術を適用するのに比べ、以下のような利点がある。

- 小さな穴や折り返し、表裏反転のないメッシュを確実に出力できる。
- 点群に大きな欠損部分がある場合も、押し付けの効果で自然なトンネル形状を得られる。出力されるメッシュの品質については、次章で具体的に報告する。

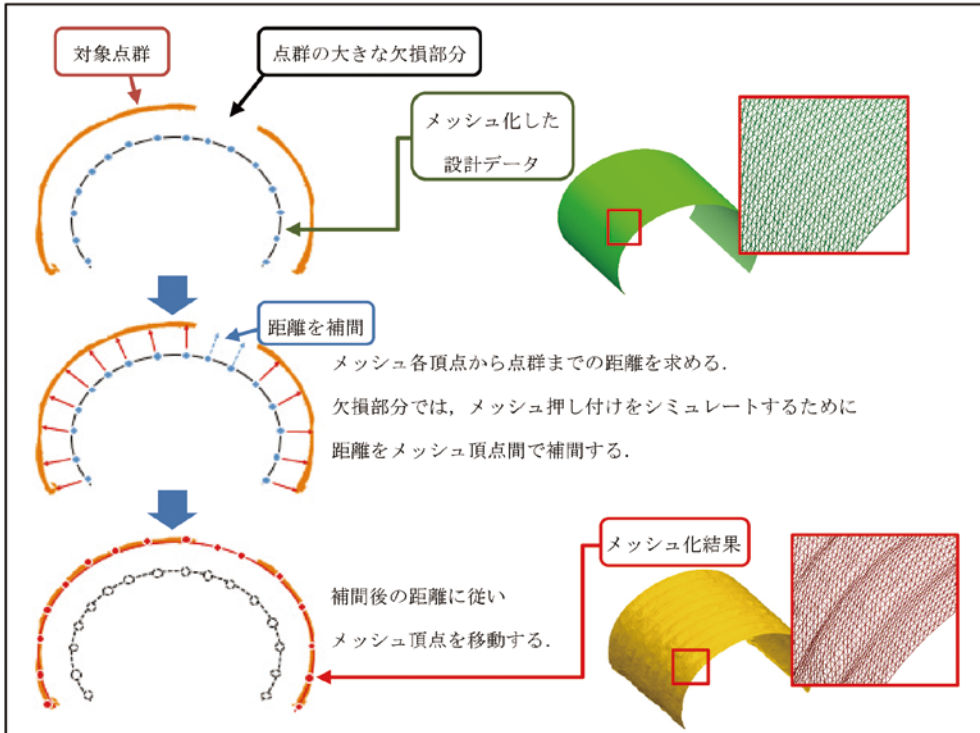


図9 計測点群のメッシュ化アルゴリズムのイメージ

### 3.4 打設前検査と打設後検査結果の可視化

打設前検査（覆工に必要なコンクリートの体積を見積もる）と打設後検査（打設したコンクリートの厚み分布を評価する）の結果は、いずれもトンネル内面各点の厚みの分布を可視化することで得られる。可視化の方法は、土木分野でよく利用されるヒートマップと呼ばれる形式を採用した。

ヒートマップは、データ行列や2次元的な広がりのある数値データをグリッド状に色分けして表示する可視化手法である。本機能では、トンネル設計データにより定義されるトンネル内面に沿ってヒートマップを表示する機能を実装した。検査結果の例を図10に示す。ヒートマップは3次元表示に加え、帳票として紙面に出力されることを見越して平面展開図でも表示するようにした。

打設前検査で要求されるコンクリート体積見積もりは、本機能ではこのヒートマップを積算する手法を採用した<sup>\*3</sup>。

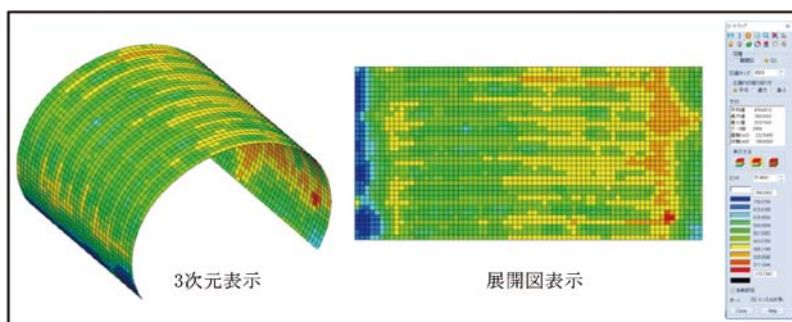


図 10 ヒートマップによる厚み分布表示（3次元，展開図）

#### 4. 検証

本章では、本機能の検証について述べる。検証の観点は以下のように定めた。

- 計測点群のメッシュ化において、不正箇所のないメッシュが出力されていること
- 計測点群とそのメッシュ化結果の離れが5mm以内であること（佐藤工業の要望）
- コンクリート体積の見積もり結果が実績値に近いこと
- 実際のトンネル施工で利用するにあたり、十分な実用性があること

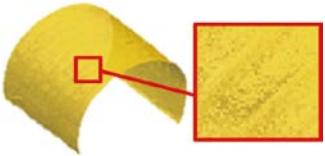
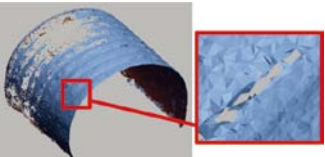
本章の各節で検証結果を報告する\*4。

##### 4.1 計測点群のメッシュ化結果の品質

形状評価をするメッシュの品質が適切であることの検証として、本機能のメッシュ化と、既存の市販ソフトウェアによる一般的なメッシュ化の比較結果を表1に示す。本機能の出力結果は、局所的な不正形状がなく、点群の大きな欠損部分を補間できているため、一般的なメッシュ化結果に比べて面的な形状評価を行うのに適したメッシュであることがわかる。また、メッシュ作成までの計算時間にも大きな差があり、本機能ではトンネルの設計データを活用して品質のよいメッシュを効率的に得られていることがわかる。

なお表1のメッシュ化は、いずれも不要な点の削除（3.2節参照）を行った吹き付け面の計測点群を使用した結果である。

表1 計測点群のメッシュ化結果の比較

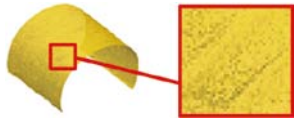
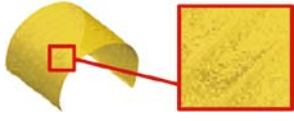
処理 S/W	メッシュ化結果	頂点数	不正箇所数	計算時間	評価結果
本機能		約 25 万	0 箇所	約 10 秒	○
市販 S/W		約 60 万	約 2 万 2 千箇所 その他大きな欠損と、 大量の非連結箇所あり	約 45 秒	×



## 4.2 計測点群とメッシュの離れ

計測点群とそのメッシュ化結果の離れを分析した結果を表2に示す。ここで「メッシュの頂点間隔」はデータのサンプリング間隔に相当する数値で、小さいほど点群の再現精度が高い。いずれも対象点群は、実際の形状がもともと細かな凹凸の多い吹き付け面の計測点群とした。計測点群にはノイズが含まれるため、全点が距離5mm以内に収まるようなメッシュを作成することは非現実的であるが、本機能で実用的な頂点間隔で作成したメッシュは、ほとんどの点が距離5mm以内に収まっていることがわかる。

表2 計測点群とメッシュ化結果の離れの比較


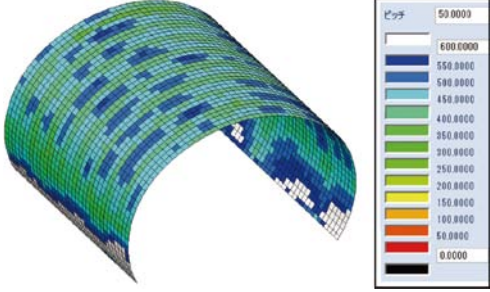

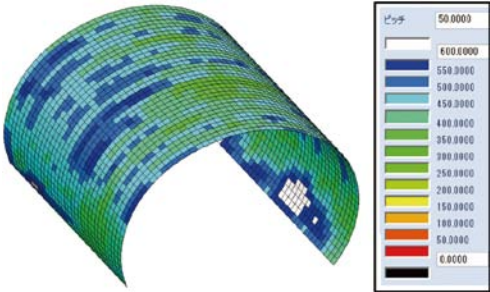
メッシュの頂点間隔	メッシュ化結果	頂点数	メッシュからの距離が5mm以内の点の割合	計算時間
10mm		約 220 万	約 95%	約 45 秒
30mm		約 25 万	約 85%	約 10 秒

## 4.3 コンクリート体積見積もりの妥当性

表3に、あるトンネルの複数の区間（それぞれ長さ10.5m、コンクリートの厚み規定値300mm）のヒートマップ計算結果と、体積見積もりの結果を掲載する。いずれも打設するコンクリート体積の見積もり結果が100m<sup>3</sup>程度となり、佐藤工業からはコンクリート体積、厚みともに現場の想定通りであるという評価を得た。今後詳細な検証として、佐藤工業でのトンネル工事におけるコンクリート量の実績値との比較を行う予定である。

なお、表3では検査結果が全体的に規定の厚み300mm（凡例の中段付近）よりも大きくなっているが、これはコンクリートの厚みを確保するために広めに掘削を行った結果であり、想定されたものである。

表3 ヒートマップと体積見積もり結果

区間名	比較対象の計測点群とメッシュ	ヒートマップ	体積(m <sup>3</sup> )
12BL			107.85
13BL			102.67

#### 4.4 実用性

本機能を利用した佐藤工業より、作業員による手作業でのコンクリート厚み測定が不要になり、従来に比べ厚み検査工数を約80%削減できたという評価を得た。

また本機能では、前章で説明した四つの機能（データの読み込み、計測点群内の不要点削除、メッシュ化、検査）を順に適用するだけで各評価シナリオを実現できるため、検査結果を非常に簡単に得ることができる。実際、佐藤工業からは、施工管理をする本部での解析を待たずに、現場でも即座に計測点群の評価結果を得られる見込みがあるとの評価を得た。

これらの評価から、本機能は実際のトンネル施工で利用するにあたり、十分な実用性があることがわかった。

#### 5. 今後の展望

本機能をより実用的にするために、以下の機能の追加を検討している。

- コンクリート厚み検査の結果を、土木工事で通常使用される出来形<sup>\*5</sup>管理帳票として出力する（図11左）。
- トンネルの任意の位置で断面を取得し、出来形管理帳票として出力する（図11右）。
- 周囲の地形形状とトンネル設計データおよび計測点群を組み合わせる表示し、視認性を向上させる。

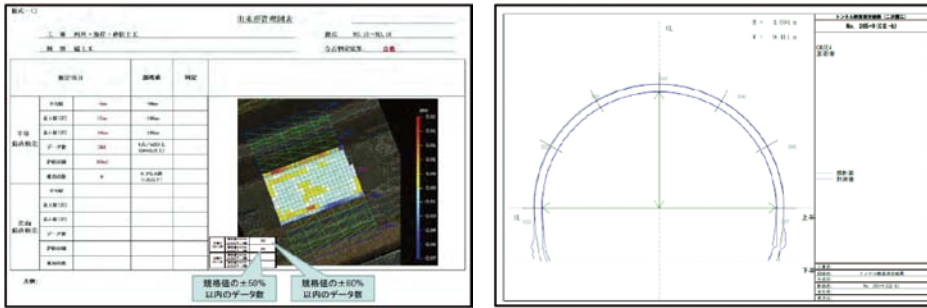


図 11 出来形管理用帳票の例<sup>[8][9]</sup>

また、トンネル施工現場や支店で本機能をより効果的に利用するため、日本ユニシスグループで ICT インフラストラクチャーを主に担当するユニアデックス株式会社と協力し、3次元スキャナの計測結果をクラウド等で管理・連携してリアルタイムに計測点群を評価するシステムとすることも検討している<sup>[10]</sup> (図 12 に構成イメージを示す)。

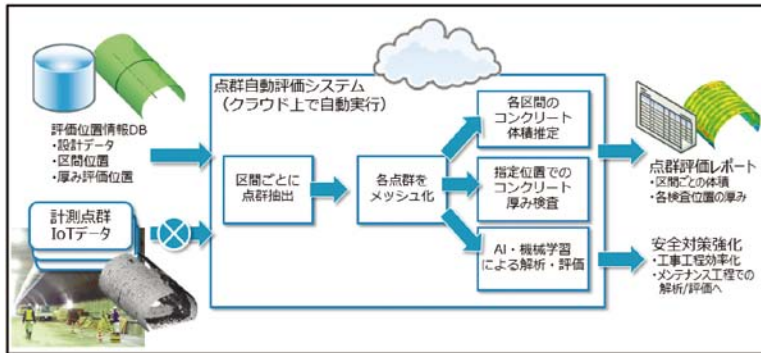


図 12 クラウドを利用した計測点群評価機能の構成イメージ

## 6. おわりに

本稿では、新規に開発したトンネル計測点群評価機能の概要と、その検証結果を報告した。トンネル施工で本機能を活用することで、コンクリート覆工のコスト削減と、従来に比べ安全・簡単に信頼性の高いコンクリート厚み検査の実現が期待できる。今後も本機能を含む土系機能開発を進め、社会に貢献できるソフトウェアに発展させていく所存である。

最後になりますが、本機能に関して多大なるご支援をいただいた佐藤工業様と、本機能の開発および本稿の執筆でご指導・ご協力いただいた皆様に感謝申し上げます。

- \* 1 ここでは、山地にトンネルを施工する際に一般的に用いられる山岳工法 (特に NATM 工法) の工程を説明する。
- \* 2 本稿では、複数の三角形を辺で隣接させてつなげた 3次元形状をポリゴンメッシュまたはメッシュと呼ぶ。
- \* 3 本来、体積の計算では、設計データとメッシュ化した吹き付け面の計測点群の間の連続的な距離分布を積分するが、本機能ではユーザーである佐藤工業の要望により、ヒートマップを積算する方法を採用している。

- \* 4 表中の計算時間は、開発用デスクトップPC (OS : Windows10 Pro 64bit, CPU : 3.70GHz, Memory : 16GB) で計測した結果である。
- \* 5 工事の目的物のうち、工事・施工が完了した部分を示す用語。

- 参考文献**
- [1] i-Construction 推進コンソーシアム, 国土交通省,  
<http://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>
  - [2] CIM とは, CIM JAPAN, <http://cimjapan.com/about/index.html>
  - [3] 大成建設「トンネル」研究プロジェクトチーム, 「最新! トンネル工法の“なぜ”を科学する」, アーク出版, 2014年1月, P83~122
  - [4] わかりやすい平面直角座標系, 国土地理院, 2002年1月,  
<https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/jpc.html>
  - [5] CIM 導入ガイドライン (案) 第6編 トンネル編, 国土交通省 CIM 導入推進委員会,  
2017年3月, <http://www.mlit.go.jp/tec/it/pdf/guide06.pdf>
  - [6] M. Kazhdan, M. Bolitho, and H. Hoppe, “Poisson surface reconstruction”, In Proc. of the Eurographics Symposium on Geometry Processing, PP.61-70, 2006
  - [7] Ohtake, Y., Belyaev, A., Alexa, M., Turk, G., and Seidel, H. “Multi-Level Partition of Unity Implicits”, ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH Proc.) PP.463-470, 2003. of the Eurographics Symposium on Geometry Processing, PP.61-70, 2006
  - [8] 関東地方整備局における i-Construction の取り組み, 国土交通省関東地方整備局,  
[http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr\\_content/content/000654177.pdf](http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000654177.pdf)
  - [9] レーザースキャナーを用いた出来形管理の試行要領 (案) トンネル編, 国土交通省,  
[http://www.mlit.go.jp/tec/it/pdf/ls\\_dekigata\\_tunnel.pdf](http://www.mlit.go.jp/tec/it/pdf/ls_dekigata_tunnel.pdf)
  - [10] 「ユニアデックス, 日本ユニシス・エクセリューションズ 佐藤工業と共同で計測点群 IoT データと設計データを用いて トンネルの掘削壁面を計測する実証実験を開始」,  
ニュースリリース, ユニアデックス, 2017年12月5日  
[https://www.uniadex.co.jp/news/2017/20171205\\_uel-satokogyo-demo-tunnel-iot.html](https://www.uniadex.co.jp/news/2017/20171205_uel-satokogyo-demo-tunnel-iot.html)

※ 上記参考文献に含まれる URL のリンク先は、2019年12月27日時点での存在を確認。

**執筆者紹介** 金井 仁志 (Hitoshi Kanai)

2009年日本ユニシス・エクセリューションズ(株)入社。自社開発3次元統合CAD/CAMシステムの形状処理機能の開発に従事。  
2012年4月より理化学研究所客員研究員。

