

# 3Dレーザースキャナと画像処理技術を用いた 変位計測システムの開発

畷田 篤志<sup>1\*</sup>・手塚 康成<sup>2</sup>・近藤 啓二<sup>3</sup>・黒沼 出<sup>4</sup>

<sup>1</sup>鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

<sup>2</sup>鹿島建設株式会社 土木管理本部 (〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11)

<sup>3</sup>鹿島建設株式会社 土木営業本部 (〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11)

<sup>4</sup>鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

\*E-mail: a-uneda@kajima.com

構造物などの形状を詳細に測定できる3Dレーザースキャナは、トンネル壁面の形状を面的に計測できることから、近年、トンネルの変位計測へ応用する技術が開発されている。しかし、3Dレーザースキャナによる測定は測定時点での形状を取得するだけで、面上の任意の点が過去のどの点から移動してきたのかを追跡することはできないので、任意点の変位量を正確に把握することは出来なかった。

そこで、筆者らは画像処理技術(テンプレートマッチング)を用いて、3Dレーザースキャナによる測定結果から得られるトンネル吹付けコンクリート面の微細な凹凸形状から任意点を特定し、その点を追跡することで変位量を算出できる変位計測システムを開発した。

**Key Words :** 3D laser scanning machine, template matching, measures displacement

## 1. はじめに

山岳トンネル工事では、安全および品質管理上、切羽周辺の地山の変位を監視することが非常に重要である。一般的に行われている変位計測は、一定間隔(概ね10～30m間隔)で計測断面を設け、1断面あたり3～5箇所ターゲットを設置して、光波測定器により測定点の変位量を測定する(図-1)。

これに対して、今回開発した変位計測システム(以降「3D マッチ」と称す)は、物体の形状を3次元で計測

可能な3Dレーザースキャナと、画像データから個々の点を認識する画像処理技術(テンプレートマッチング)とを組み合わせ、トンネル壁面の変位量を面的に計測しようとする新技術である(図-2)。「3D マッチ」を使用することにより、あたかも無数のターゲットを設置して計測したかのように、トンネル壁面の任意の位置の変位量を3次元的に知ることができる。

本稿では、従来計測や3Dレーザースキャナ計測の課題とそれを解決した「3Dマッチ」の特徴について紹介する。



3～5箇所ターゲットを設置してその点の変位を光波測定器にて測定する。

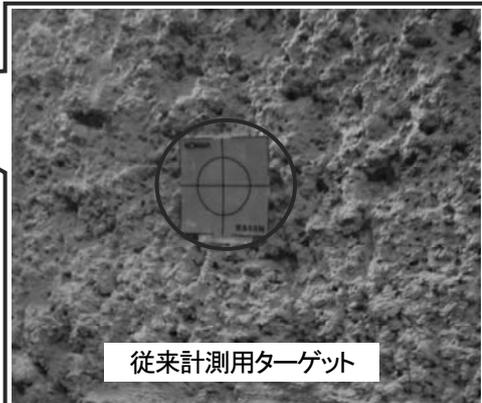


図-1 従来計測の概要

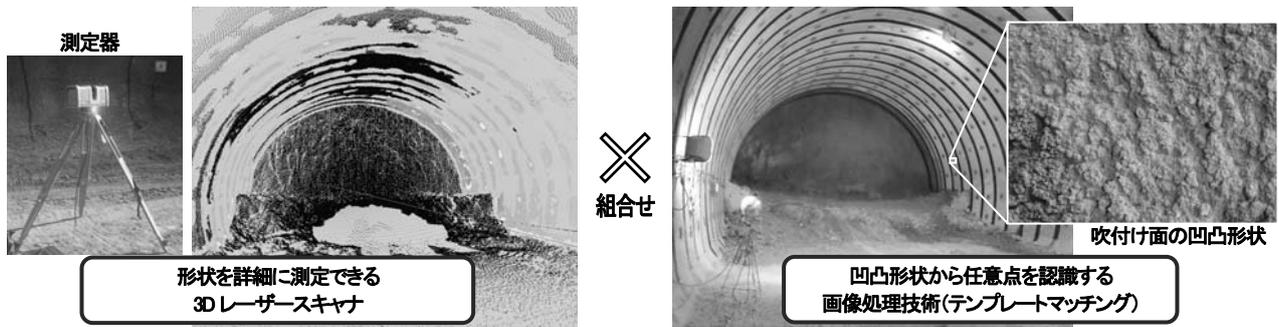


図-2 「3Dマッチ」の概要

## 2. 従来計測手法の課題

従来のトンネル変位計測手法は、前述のとおり10～30m間隔で3～5点の測定なので、トンネル全体の挙動を正確に把握できない場合がある。例えば、トンネル背面に未確認の断層等の弱層が存在する場合には、部分的な押し変位を把握できずに支保工の変状を生じさせてしまう可能性がある。

表-1は、地盤条件が異なる条件下で、同等の天端沈下・内空変位が発生する場合をFEM解析で模擬し、その時の変形および支保工発生応力を比較したものである。

この結果より、天端・左右側壁の3点の計測から算出される天端沈下・内空変位の値が仮に同じであっても、背面の弱層（断層）の影響によって部分的な押し変位が発生して支保工に過大な応力が発生する可能性があることが分かる。

したがって、特に大変位や部分的な変位が予想される場合には、支保変状を生じさせないためにも、変位を面的に把握しながら施工する必要がある。この点において、面的に3次元で測定できる3Dレーザースキャナは、このニーズに合致したツールであると言える。

表-1 地盤条件が異なる条件下で同等の天端沈下・内空変位が発生する場合のトンネルの変形・支保工発生応力の比較 (FEM解析)

		均質な地質の場合	背面に未確認の弱層（断層）が存在する場合
変形図			
	曲げモーメント		
支保工応力	軸力		
	応力照査	① $\sigma=149 < 210(\text{N}/\text{mm}^2)$ ...OK ② $\sigma=143 < 210(\text{N}/\text{mm}^2)$ ...OK ③ $\sigma=143 < 210(\text{N}/\text{mm}^2)$ ...OK	① $\sigma=117 < 210(\text{N}/\text{mm}^2)$ ...OK ② $\sigma=233 > 210(\text{N}/\text{mm}^2)$ ...NG ③ $\sigma=133 < 210(\text{N}/\text{mm}^2)$ ...OK

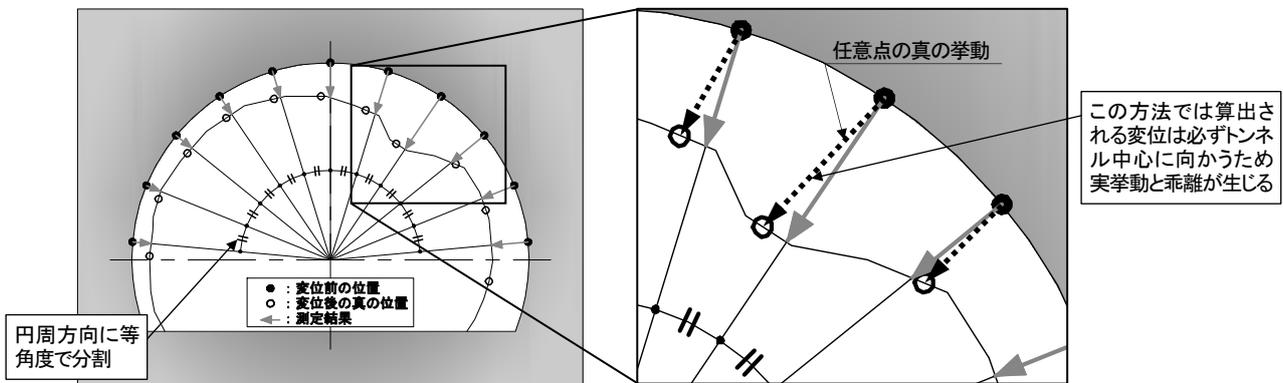
### 3. 3Dレーザー計測の課題

3Dレーザースキャナは面的に3次元で計測可能なので、トンネル壁面形状を日々計測してその結果を重ね合わせることで、形状変化を把握することができる。しかし、壁面の形状変化を把握するだけなので、面上の任意の点が過去のどの点から移動してきた点なのか把握できない。つまり、日々の測定結果毎に同一点を特定できないので、任意点の変位量を正確に把握できないのである。トンネル全体の挙動を把握するためには、任意点がどの方向にどの程度変位したかを把握することが重要であり、3Dレーザースキャナをトンネル変位計測へ適用するにあたっては、日々の測定結果毎に同一点を如何に特定するかが課題であった。

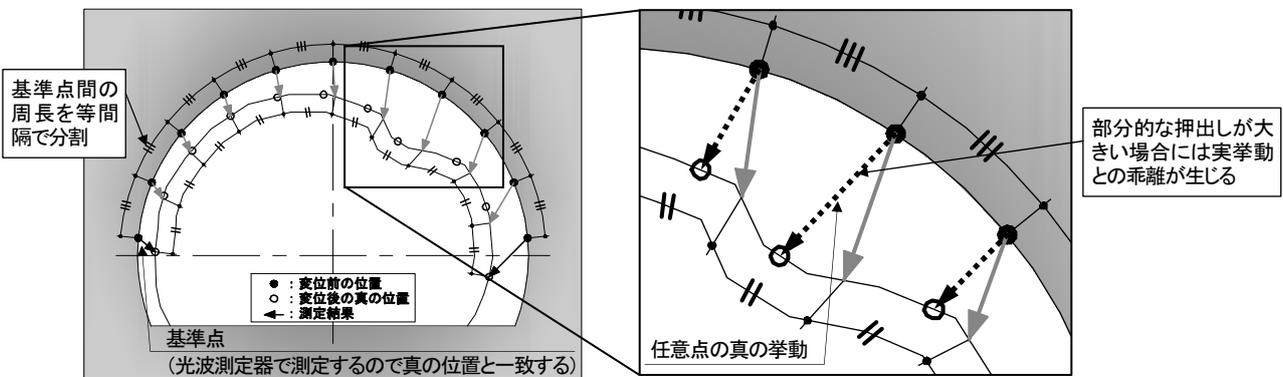
近年、3Dレーザースキャナをトンネル変位計測へ適用するにあたり、同一点を特定（推定）する方法などの技術が他社でも開発されている。以降にその例を示す。

#### (1) 円周方向に等角度で分割した点を同一点と仮定する方法（図-3(a)）

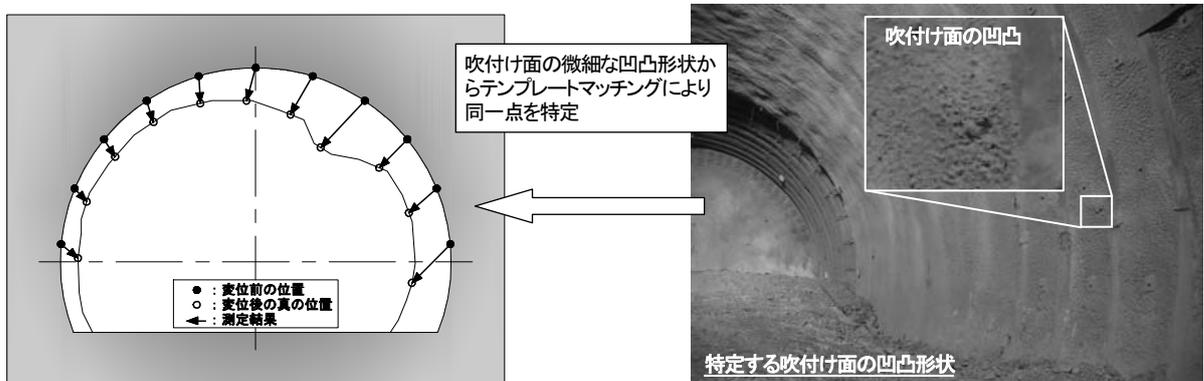
この方法は、日々の3Dレーザースキャナによる測定結果を重ね合わせて、トンネル中心から円周方向に等角度で分割し、分割した線との交点を同一点と仮定する方法である。この方法により算出されるトンネル壁面の変位はトンネル中心に向かうことになる。トンネルの変位は必ずしもトンネル中心に向かうとは限らず、部分的な押し出し変位など、変位に偏りがある場合などには実際の変位との乖離が大きくなる。



(a) 円周方向に等角度で分割した点を同一点と仮定する方法



(b) 基準点を計測し基準点間を等間隔で分割した点を同一点と仮定する方法



(c) 「3D マッチ」

図-3 3D スキャナ計測結果からの任意点変位量の算定方法比較

## (2) 基準点を計測し基準点間を等間隔で分割した点を同一点と仮定する方法 (図-3(b))

この方法は、基準点 (2~3点) を光波測定器で測定し、日々の3Dレーザースキャナによる測定結果の基準点間の周長を等分割した点を同一点と仮定する方法である。既知の基準点を設けてその間を補間することで、同一点の特定 (推定) 精度を向上し、より実際の変位に近づけようとするものである。しかし、周長を等間隔で分割するので、図-3(b)に示すとおり変位が部分的に大きい場合などでは、実際の変位との乖離が大きくなる。

以上の手法は、同一点を仮定する手法であり、いずれも厳密には任意点を3次的に追跡しているとは言えない。

この課題を解決したのが「3Dマッチ」である。「3Dマッチ」は3Dレーザースキャナによる測定結果から得られる吹付け面の微細な凹凸形状から同一点を特定し、その点を追跡することを可能とした計測システムである。これにより、任意点の変位量を仮定を設けることなく直接的に、且つ、3次的に把握できる (図-3(c))。

## 4. 『3Dマッチ』の概要

トンネル掘削によりトンネルは変形するが、その表

面 (吹付け面) の微細な凹凸形状はトンネルの変形前後で変化しない。このことに着目して、「3Dマッチ」では、画像処理技術 (テンプレートマッチング) を応用することで、微細な凹凸形状を認識・追跡することを可能とした。テンプレートマッチングとは、画像の中から特定のパターンを検出してマッチングするもので、近年では防犯やセキュリティ管理の分野で、人物特定の技術として応用が進んでいるものである。

3Dレーザースキャナで取得した日々の測定結果毎に、指定した任意点周辺の凹凸パターンを探し出してマッチングすることで、同一点を特定する (図-4)。これにより、任意点の追跡が可能となる。また、吹付け面は微細な凹凸形状を無数に有しているため、あたかも無数のターゲットを設置して計測したかのように、無数の点の変位を把握できるのも「3Dマッチ」の特徴である。

## 5. 『3Dマッチ』の実現場への適用

実際のトンネル工事現場にて「3Dマッチ」を用いて変位計測を実施した (図-5)。天端沈下について従来手法 (光波測定器) で測定した結果との比較を図-6に示す。これより、両者は高い相関を保ちながら推移しており、「3Dマッチ」の実現場への適用性を確認できた。

また、「3Dマッチ」を切羽面の変位計測に適用した結

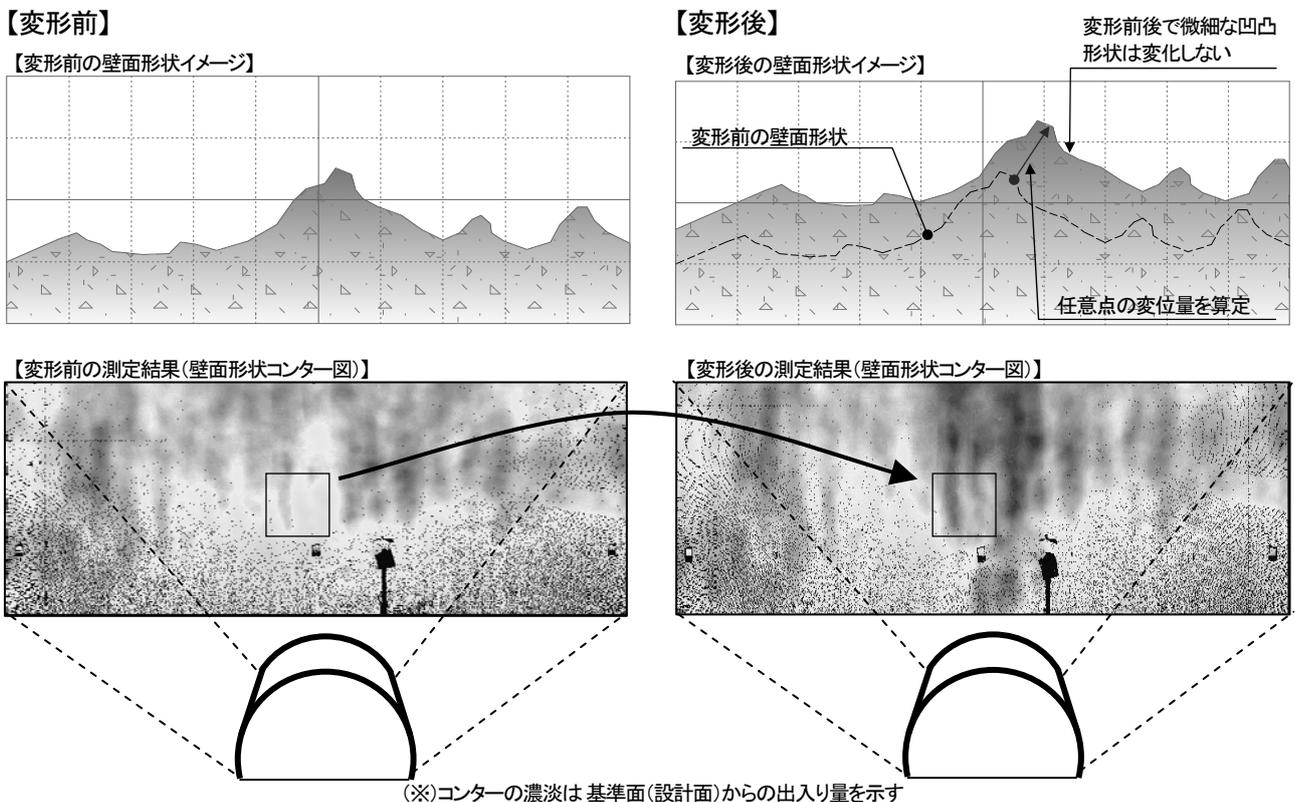


図-4 テンプレートマッチングによる同一点の特定方法概要

果を図-7に示す。これは、切羽停止約48時間後の奥行き方向変位をコンター図で表したもので、切羽中心部ほど変位が大きいのが確認できる。「3Dマッチ」を切羽計測に適用することで、切羽面の任意点がどの方向にどの程度動いているのかを明確に把握できるので、「3Dマッチ」は切羽の安定性評価や対策工の効果的な配置計画にも有効に活用できる。



図-5 測定状況

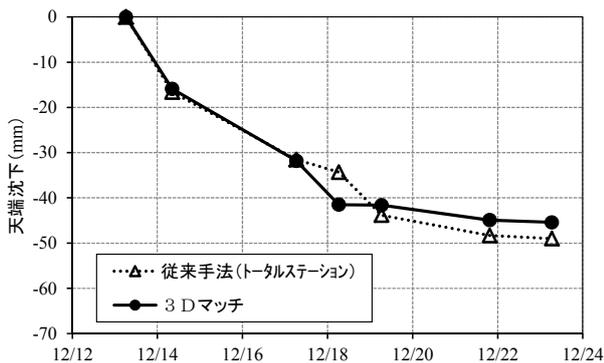


図-6 従来手法との対比 (天端沈下)

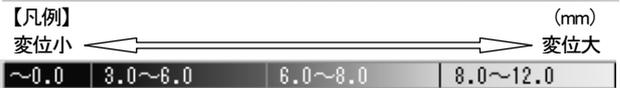
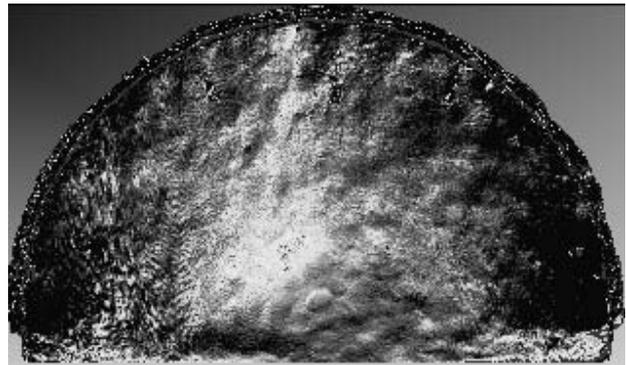


図-7 切羽変位計測結果 (奥行き方向変位)

## 5. おわりに

3Dレーザースキャナと画像処理技術を組合せて新しい計測システム「3Dマッチ」を開発し、実現場への適用性についても確認した。今後は、特に大変位や部分的な変位が発生するような山岳トンネル工事に、「3Dマッチ」を積極的に適用して、トンネル工事の安全性やトンネル品質の向上に役立てたいと考えている。

また、「3Dマッチ」は山岳トンネルを対象に開発したものであるが、3Dレーザースキャナで測定できる対象物であれば、他の構造物についても適用可能と考えられる。今後は、その他構造物に対しても積極的に適用性を検証していきたい。

## 参考文献

- 1) 池田 廉, ほか: 山岳トンネルにおける定点追尾システムを利用した 3D スキャナ変位計測, 土木学会第 68 回年次学術講演会, VI-406, pp.811-812, 2013.

## DEVELOPMENT OF DISPLACEMENT MEASUREMENT SYSTEM BY 3D LASER SCANNER AND IMAGE PROCESSING TECHNIQUE

Atsushi UNEDA, Yasunari TEZUKA, Keiji KONDO and Izuru KURONUMA

A 3D laser scanner, which can precisely measure structure's shapes, has been recently used to measure the displacement of tunnels. However, the 3D laser scanner cannot be used to measure the displacement of an exact point because the measured points by the 3D laser scanner don't show the paths of each displacement but show the place at each measurement.

Then, the displacement measurement system has been developed by the authors. This can trace the displacement of an exact point by the template matching technique which can identify an exact point by a minute shape at every measurement.