

走行型レーザ計測による トンネル内路面変状可視化の試み

VISUALIZATION OF ROAD SURFACE CONDITION IN TUNNEL USING LASER MEASUREMENT BY MOBILE MAPPING SYSTEM

土門 剛¹・小西 英之²・小宮 一公²・中野 清人³

Tsuyoshi DOMON¹, Hideyuki KONISHI², Katsumasa KOMIYA²
and Kiyoto NAKANO³

In general health examinations in humans, it is helpful to prevent serious diseases and to serve as a guide for improvement of living conditions by indexing diagnostic results. Even in tunnels, it is important to predict big trouble or failure to some extent by simple evaluation method like general health examinations.

Therefore, as the first step of general health examination of tunnel, we tried to visualize the road surface condition that can be evaluated by the relative value between data obtained from the three-dimensional point cloud data measured by MMS. As a result, it was possible to visualize up to the uplift of the roadbed which causes a failure in tunnel lining from a relatively small scale road surface unevenness. Also, we evaluated the road condition by simple guidelines.

Key Words : tunnel, inspection, Mobile Mapping System, road surface condition, simple evaluation

1. はじめに

わが国の道路トンネル約1万本のうち，建設後50年を超えるトンネルが約2割にも及ぶ¹⁾。

道路トンネル点検定期点検要領²⁾によると，5年に1回の頻度で実施することを基本とする定期点検は，点検員が近接目視により行うことを基本とし，必要に応じて触診や打音等の非破壊検査等を併用して行うこととしている。しかし，点検には道路の車線規制を伴うこと，点検員による点検結果あるいは評価には個人差が生ずること，さらに，閉所空間での高所作業で危険を伴うことなど様々な問題を抱えている。

そのような背景から，効率的で客観的な評価を行うことを目的に車線規制の必要としない走行型レーザ計測のトンネル点検への導入が盛んに試みられている。走行型レーザ計測を用いて簡易で客観的な評価を行うことで，早急に補修を必要とするトンネルを識別できれば，点検を主とした維持管理業務の効率化を図ることができる。

しかし，トンネル内における走行型レーザ計測では，

得られた点群データからだけでは定規とすべきトンネル基準断面を設定することが困難であること，またトンネル内ではGPSを受信しにくい環境下にあるため，点群データの座標値（絶対値）の信頼性が低いことなど，多くの課題があることも事実である。

本研究では，走行型レーザ計測のひとつであるMMS（Mobile Mapping System）により計測した道路トンネルの三次元点群データから，データ間の相対値による評価が可能な路面変状に着目し，わだちなどの比較的小規模な凹凸から，トンネル覆工体への不具合や変状を及ぼす原因にもなりうる路盤隆起（盤ぶくれ）などの比較的大規模な変状を対象として路面状態を可視化し，その結果から路面状態の簡易な評価を試みる。

本研究では，とくに評価手法の簡便さに重きを置く。すなわち，人間における一般健診が診断項目の指標化によって重い疾病を未然に防いだり，生活改善の目安として役立てられているように，トンネルにおいても簡易評価手法，言い換えればトンネル一般健診があれば，大きな不具合をある程度予知し，長寿命化への一助になり得

キーワード：トンネル，点検，走行型レーザ計測，路面変状，簡易評価

¹正会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 助教 Assitant Prof., Tokyo Metropolitan University (E-mail:dom@tmu.ac.jp)

²非会員 株式会社CSS技術開発 CSS Co., Ltd.

³正会員 株式会社ネクスコ東日本エンジニアリング NEXCO-EAST Engineering Co., Ltd.

るものと思われる。

2. 走行型レーザ計測のトンネルへの適用に対する現状と課題

ここでは、走行型レーザ計測のトンネルへの適用や路面状態評価の活用に関連する既往の研究をレビューする。

水口ら³⁾は、トンネル点検の課題解決を目的として、トンネル走行型計測車両MIMM (Mobile Imaging Technology System & Mobile Mapping System) による効率化および高精度化に取り組んでいる。この研究では、MIMMによって、ひび割れ、漏水、補修材跡、付属施設の錆等、変状箇所の正確な位置、形状、寸法、段差や内空形状からの変形モード有無などを、事前に把握できることを明らかにし、マネジメントにおいて抱える多くの課題に対応できている。この研究ではさらに、MMSで得られる点群データとトンネルの推定出来形断面を比較してコンター図を作成し、トンネル覆工の変状の可視化を試みている。しかし、三次元の推定出来形断面の特定から、その断面と計測点との比較によって得られるコンター図を作成するに至るまでの点群データの解析が非常に困難で手間の掛かる作業である。また、ひび割れ認知精度とコストとのバランスがやや劣ることなどの課題も考えられる。

菅原ら⁴⁾は、矢板工法で施工されたトンネルに着目し、ひび割れ発生原因究明のために走行型レーザ計測を実施して覆工形状の分析を試みている。計測で得られた点群データを分析した結果、打設スパン毎に同様の覆工変形状態であることから、外力によってひび割れが生じたのではなく、型枠形状の初期不整等の施工不良によるものが原因であるとしている。この成果により、矢板工法で施工された覆工にひび割れが観察された場合には、これが外力によるものであるか、施工状況の影響によるものであるかを区別することが重要であり、それによって補修方法を変えるべきであると主張している。しかし、この研究でも基準断面の設定が複雑であると思われる。本研究では、仮の基準断面を設定し、それに密集した点群の中から代表点を定め、それらを最小二乗法することにより代表点の並びを近似する円（最適円）を求め、その曲率半径や代表点の最適円からの距離で覆工形状を捉えるといういくつかのプロセスを踏む。プロセスが複雑であることもあるが、この方法によれば局所的な覆工変状は確認できるが、数スパンにわたった変状の確認がしにくいとも指摘されている。

石川⁵⁾は、三次元空間情報計測の高精度化、高効率化を目指し、従来型から発展させより高精度な位置姿勢標定装置で構成される複合姿勢標定装置を開発している。さらに、この位置標定装置と正確に同期した属性センサ

から構成されるMMSの構築を行い、高精度・高効率な三次元移動計測システムの構築を実現している。この構築したシステムの有効性を確認するため、道路付帯設備の計測、道路管理への応用、架空線計測管理、トンネル形状の計測を実際に行った結果、構築したシステムは従来の測量機材に匹敵する精度で従来の機材よりも高効率に計測を行うことが可能であることを確認し、システムの有効性を確認している。しかし、本研究で明らかにされたように、GPSを受信できない環境下でのMMS計測では、高精度な機器であっても誤差が少なからず生じてしまうことも示している。また、1000m以上の長スパンのトンネルについて計測した場合には、とくに実際の値との誤差が大きくなる可能性があることも示唆している。

一方、GPS受信に支障ない環境下にある明かり部分の道路舗装にも三次元点群データを用いた路面性状評価が試みられている。

たとえば森石ら⁶⁾は、道路地図・台帳の整理に活用されているMMSに着目し、MMSを利用した効率的な路面性状調査手法に関する検討結果を公表している。これによれば、三次元点群データをもとに作成したコンター図により路面凹凸の程度が確認できること、さらにFWD（舗装構造評価装置）によるたわみ量と著者らの求めた路面凹凸体積との相関関係も明らかにしている。

以上の既往研究における課題のみ整理すると、1) トンネルによる上半部覆工のMMSを用いた評価には、基準断面の設定が様々に複雑であり、その設定法が確立されていないこと、2) 路面舗装にもMMSが適用されているが、トンネル内道路面の凹凸には適しているかどうか定かではないこと、等あげられる。本研究は、これらの課題を補完するものと位置づけられる。

3. トンネル路面変状の可視化手法

(1) MMSによるトンネル計測

a) 使用機器等

計測に用いたMMSはLeica製Pegasus Twoである。本機は、レーザスキャニング密度および距離計測密度がそれぞれ約100万点/秒および0.2mmと高密度であること、IMU（慣性記憶装置）が200Hz、絶対位置精度が15mm以内と高精度であること、機器搭載専用車両を必要とせず、また比較的コンパクトであることから機動性にも優れている（図-1）。

b) 計測対象トンネル

NEXCO東日本管内における高速道路トンネル上下線計4本を路面変状の可視化対象とした。



図-1 軽ワゴン後方に設置した MMS 機器

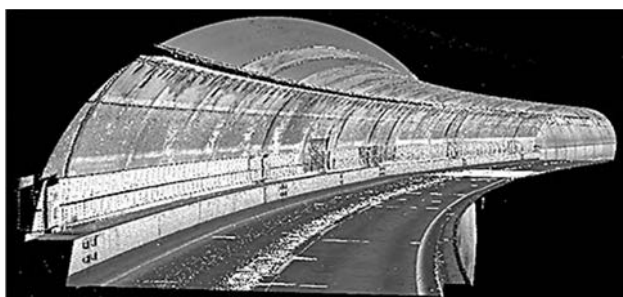


図-2 処理前の点群データ

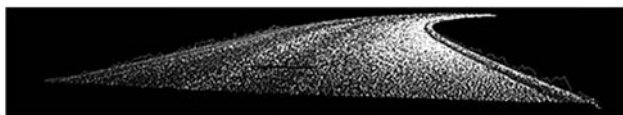


図-3 処理後（路面のみ）の点群データ

これらのトンネルはグリーンタフ分布地域に位置する。このような地域に位置するトンネルでは、トンネル完成後、長期間を経過して路盤隆起（盤ぶくれ）が顕著になる⁸⁾。計測対象トンネルのうち路盤隆起を生じたトンネルは、その多くがグリーンタフ分布地域に位置している。また、インバートの未設置区間を有し、この区間の一部では、既に路盤隆起が生じている箇所もある。

(2) 三次元点群データの処理

取得した点群データから路面等高線を作成するステップを以下に示す。

〔STEP1〕 不要な点の除去

レーザスキャナは短時間で大量の点群を取得できるが、図-2のように、点群データにはノイズが含まれる。そこで、トンネル上半の覆工や周囲の車といった障害物等の不要な点を削除し、図-3のように路面のみの点群データにする。

〔STEP2〕 間引き処理

点群データに同一座標がある場合、正常に三角網計算ができないため、重複点を削除する。すなわち点群を間引く。本研究では、判定範囲を着目点から半径20cmの球と設定し標高最低点のみを残した。つまり、半径

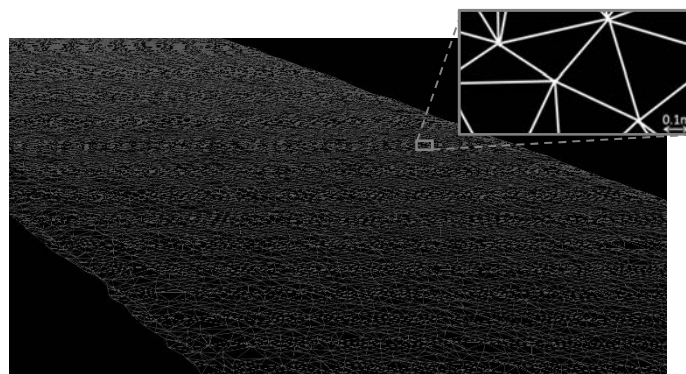


図-4 路面上の三角網

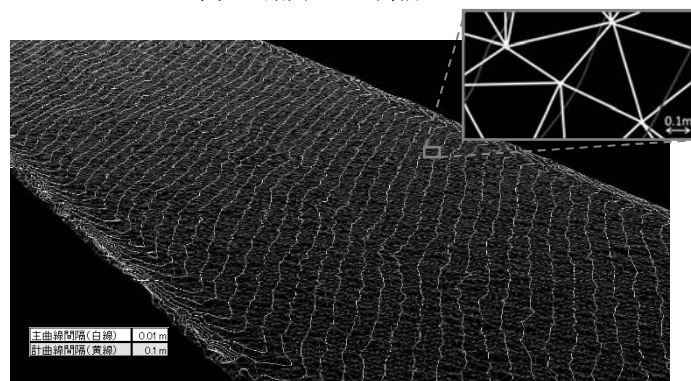


図-5 三角網から得た等高線

20cmの球内で標高値が最も低い点のみを残し、それ以外の点を削除することとした。

〔STEP3〕 三角網計算

図-4のように隣り合う点同士を直線で結び、路面を三角形の集合（三角網）として表現する。これはTINメッシュとも呼ばれる。

〔STEP4〕 等高線作成

三角形の辺上の標高値と他の辺上における標高値とが等しい点同士を直線で結ぶ。結ばれた直線を平滑化することで図-5のように等高線を得ることができる。なお、図中に示す等高線はすべて主曲線（白線）間隔が0.01m、計曲線（黄線）間隔が0.1mである。

(3) 段彩図による路面状態の可視化

以下に示す2種類の段彩図（グラデーション図）で路面変状の可視化を試みた。

a) 縞段彩図

中心標高値、最大標高値、最小標高値を指定することにより、その範囲で図-6のように標高値ごとに等高線に沿って配色される。本図のように等高線が縞模様になっていることから縞段彩図とよぶこととする。

b) 傾斜値段彩図

三角網におけるひとつひとつの三角形が水平面に対する角度を傾斜角とし、ある範囲の傾斜角（ $^{\circ}$ ）ごとに色分けすると図-7のように表現される。これを傾斜値段彩図とよぶこととする。

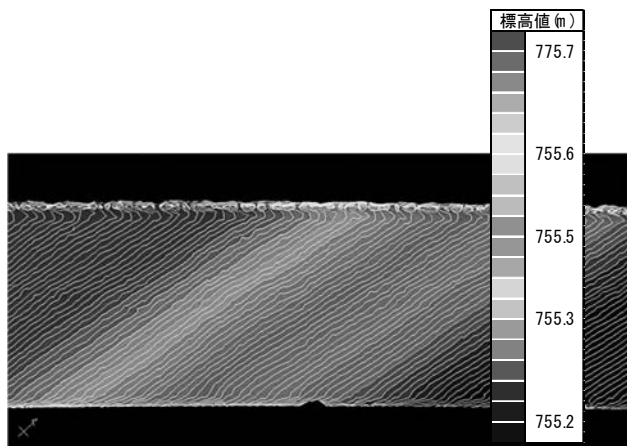


図-6 縞断彩図（平面図）の例

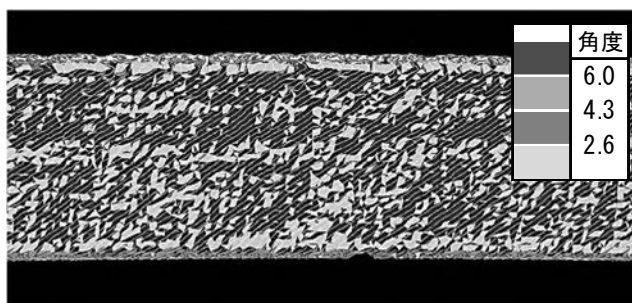


図-7 傾斜値段彩図（平面図）の例

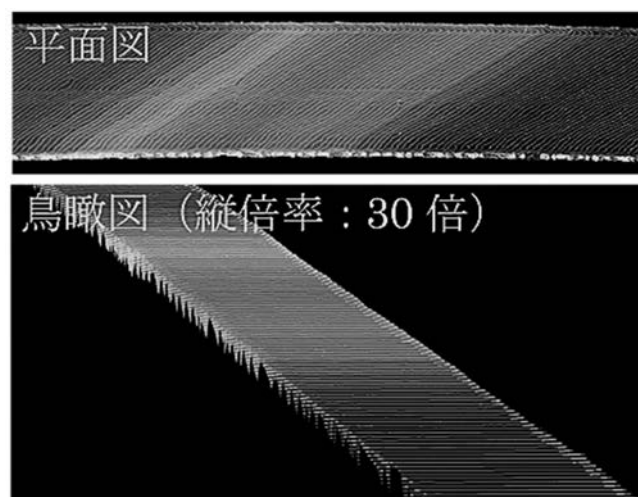


図-8 凹凸や変状なしの等高線パターン

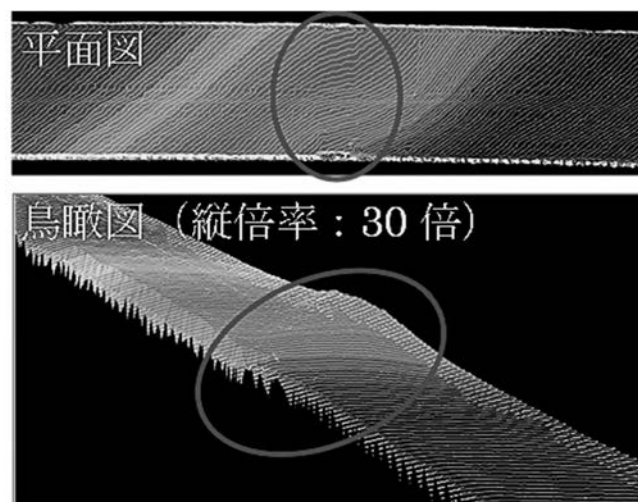


図-9 変状ありの等高線パターン

4. 路面変状の可視化と簡易評価

(1) 段彩図による路面変状の可視化

a) 等高線パターン

等高線パターンによっておおよその路面性状（路盤隆起の有無）が明らかになる。すなわち、縞段彩図を用いれば図-8のように等高線が等間隔でかつ1本1本の等高線がほぼ直線であれば路面勾配が一定となり、隆起は生じていないと判断できる。一方、図-9のように、中央部付近（赤枠内）では等高線がトンネル軸方向にのびているため、鳥瞰すると中央部（赤枠内）のように隆起していることが明瞭にわかる。このように等高線の並びから明らかに異常が判断できる地点では、縞段彩図を用いて変状区間のおおよその範囲を特定することができる。

b) 傾斜角パターン

等高線の並びだけでは捉えられない小規模の変状（わだちのような路面凹凸）を三角網の傾斜角の違いによって捉えることとする。傾斜値段彩図は入力した傾斜角によって配色される。ここではひとつの目安として、傾斜角の設定を道路構造令⁹⁾の道路勾配の基準から以下のように設定した。

〔合成勾配 10.5%以下（設計速度80km/h）〕

以下の式より勾配を角度へ変換する

$$\text{勾配 (\%)} = \frac{y}{x} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{勾配 (度)} = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (2)$$

ここで、 x は水平方向距離、 y は鉛直方向距離を示している。

式 (1) および (2) より

$$\text{勾配 (度)} = \tan^{-1} \frac{\text{勾配 (\%)}}{100} \quad (3)$$

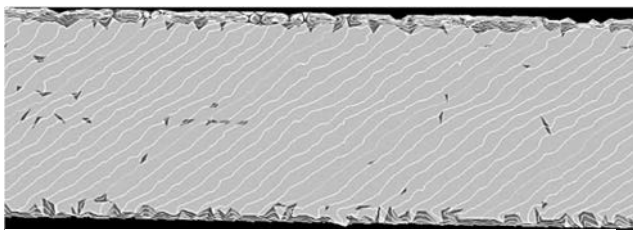
式 (3) より

$$\tan^{-1} \frac{10.5 (\%)}{100} = 6.0 (\text{度})$$

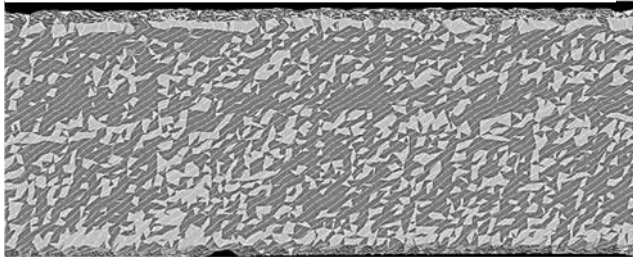
〔横断勾配 1.5%以上2.0%以下、縦断勾配 4.0%/7.0%※
以下（設計速度80km/h）〕

※地形の状況その他の特別の理由によりやむを得ない場合は7.0%以下

これらの基準から合成勾配を求め角度へ変換する。合成勾配は道路構造令から以下のように定義される。

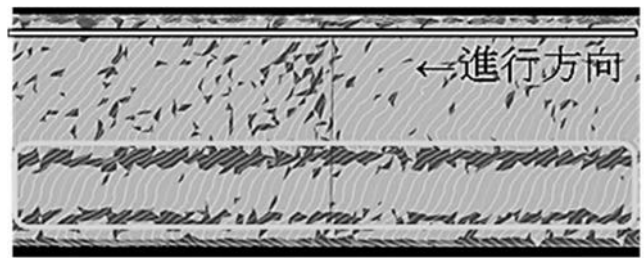


(a) 傾斜角ほぼゼロ（水平）

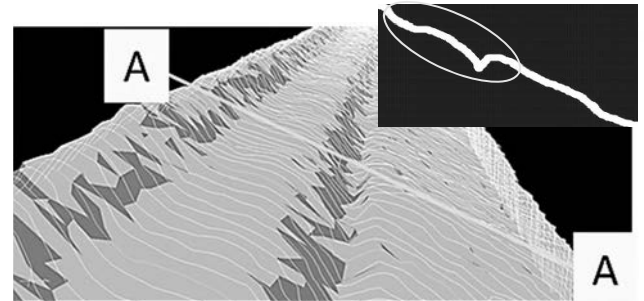


(b) 傾斜角はあるがほぼ一定値

図-10 傾斜値段彩図による傾斜角パターンの例



(a) 走行車線側に連続した傾斜を有する箇所



(b) 鳥瞰図（右上は簡易断面図、縦倍率：30倍）

図-11 傾斜値段彩図による傾斜角パターンの例

合成勾配 (%)

$$= \sqrt{\text{縦断勾配} (\%)^2 + \text{横断勾配} (\%)^2} \quad (4)$$

式 (4) より

$$\sqrt{2.0 (\%)^2 + 4.0 (\%)^2} = 4.5 (\%)$$

$$\sqrt{2.0 (\%)^2 + 7.0 (\%)^2} = 7.3 (\%)$$

式 (3) より

$$\tan^{-1} \frac{4.5 (\%)}{100} = 2.6 (\text{度})$$

$$\tan^{-1} \frac{7.3 (\%)}{100} = 4.2 (\text{度})$$

以上より、傾斜角による配色を行う。

道路勾配の基準は排水勾配や自動車の徐行・降雪時のスリップ等を防止するために定められており、道路全体として評価すべきものである。ここでは、ひとつの目安として点群データによる三角形の傾斜角に対してその勾配を適用しただけであり、あくまでも変状箇所を可視化するための参考値としてこの基準値を採用していることに留意されたい。

傾斜値段彩図では、図-10 a)に示すような色にばらつきのない区間は異常なしと判断される。また、図-10 b)のように全体的に傾斜角が大きい場合でも、周囲との配色に違いがなければ、勾配自体に変化がないので、変状はないと判断される。なお、路面両脇の傾斜角が大きくなっている箇所（赤色部）は側溝である。

また、図-11 a)のように縦断方向（特に走行車線側）に連続して色が変化している箇所は図-11 b)のようにわだちを示している。これはわだちが生じやすいアスファ

ルト舗装のトンネルにおいてみられた。一方、わだちが生じにくいコンクリート舗装は4本のうち3本のトンネルで、いずれもわだちがほとんど認められなかった。

(2) 変状箇所の簡易評価

a) 路盤隆起を判断するための指標

路盤隆起が認められた変状区間について、点群データから具体的な数値を求め、変状の程度を検討した。

路盤隆起に対する判断基準は明確には設けられていない。そこで、本研究では、路盤隆起が認められたトンネル路面状況を確認する際に採用された以下の基準を参考基準（目安）として採用した。

- ・段差の補修目標値※：橋梁の取り付け部 20mm，横断構造物取り付け部 30mm¹⁰⁾

- ・オーバーレイの摺り付け勾配：100km/hで 5%（寒冷地 6%）¹¹⁾

※補修目標値・損傷がこの値に達するまでに補修を行うことが望ましいことを示す値

b) インバート設置の有無による比較

図-12 に示した変状区間は地山等級 CII のインバート未設置区間である。一方、図-13 の区間は地山等級 DI のインバート設置区間で、わだちは生じているものの路盤隆起はない。現在の高速道路トンネルにおける設計要領では、地山等級 C においても泥岩、凝灰岩、蛇紋岩であればインバートを原則設置することになっており、この変状区間においてもインバートの設置対象となる。しかし、以前の設計要領では、地山等級 C ではインバート設

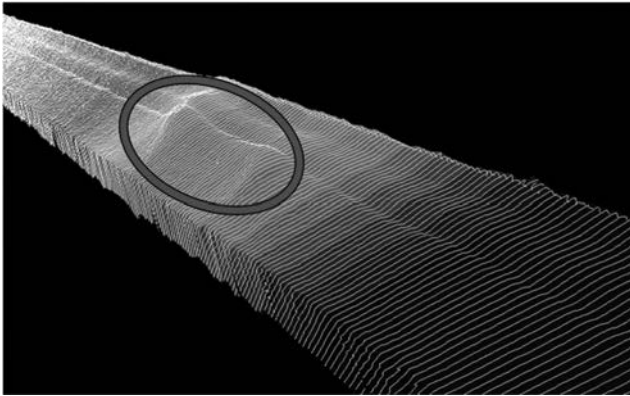


図-12 路面隆起が生じているインバート未設置区間

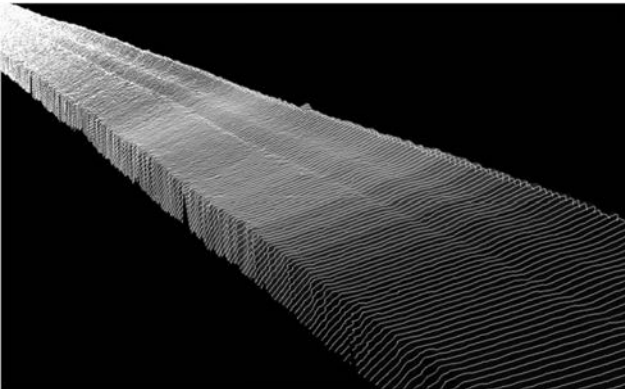


図-13 路面隆起が生じていないインバート設置区間

置は必須でない。そのため、このインバート未設置区間は、路盤隆起の生じる危険性がもともと高かったものと判断される。

c) 変状区間の隆起量の推定

この変状区間（インバート未設置）と隆起無し区間（インバート設置）を比較することにより、変状区間の隆起量を求める。

変状区間、隆起無し区間でそれぞれ、中心線（走行および追越車線との境）に沿って道路長 40m の範囲の標高値から簡易縦断面図を作成した（図-14 および図-15）。

隆起無し区間のグラフは図から明らかなように路面勾配がほぼ一定となった。このグラフの近似直線を非変状区間縦断面とし、その上に変状区間の簡易縦断面を重ねると図-16 が得られる。本図より、路面軸方向距離 10m ～30m にかけて隆起していることが確認できる。

d) 変状区間縦断面と非変状区間縦断面との差の求め方

隆起量を推測するため、路面軸方向距離 0.2m ごとに変状区間縦断面と非変状区間縦断面との差（ s ）を求める。

変状区間縦断面（図中青線）上の点の座標を（ D, H ）とする（ D : 路面軸方向距離, H : 標高値）。変状区間縦断面の路面軸方向距離 0.2m ごとの点と非変状区間縦断

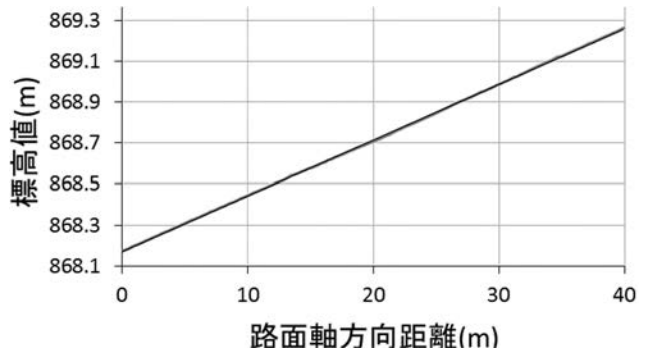


図-14 隆起なし区間＜中心線＞の断面

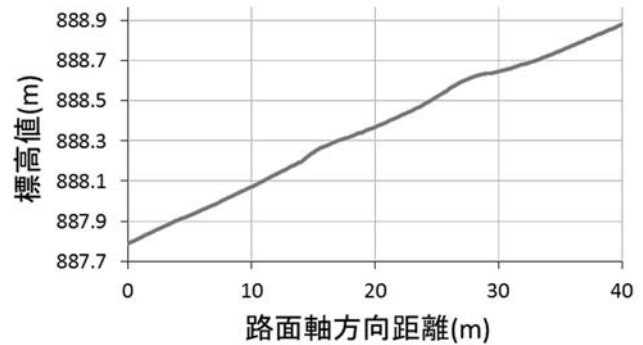


図-15 隆起あり区間＜中心線＞の断面

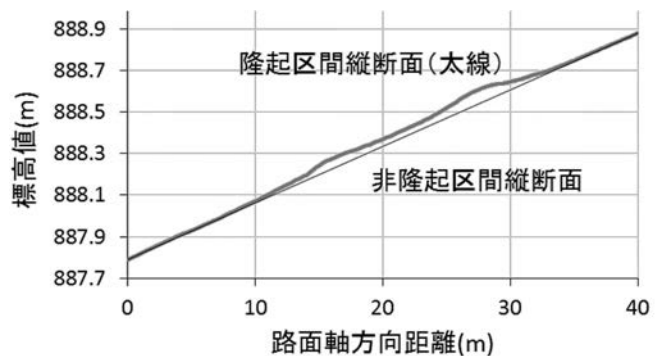


図-16 隆起ありとなし区間＜中心線＞の重ね合わせ断面

面（図中黒直線）（ $y = mx + n$ ）との距離 s を式（5）より求める。

$$s = \frac{|H - m \times D - n|}{\sqrt{1 + m^2}} \quad (5)$$

この変状区間（インバート未設置）と隆起無し区間（インバート設置）を比較することにより、変状区間の隆起量を求める。

ここで、 H は変状区間縦断面の標高値（ m ）、 D は変状区間縦断面の路面軸方向距離（ m ）を示している。 m 、 n は非変状区間縦断面を示す式 $y = mx + n$ より用いる。

この式により、変状区間縦断面と非変状区間縦断面との差を求めることができる。

中心線における変状区間縦断面と非変状区間縦断面との差の最大値を求めると 69.6mm となった（図-17）。同

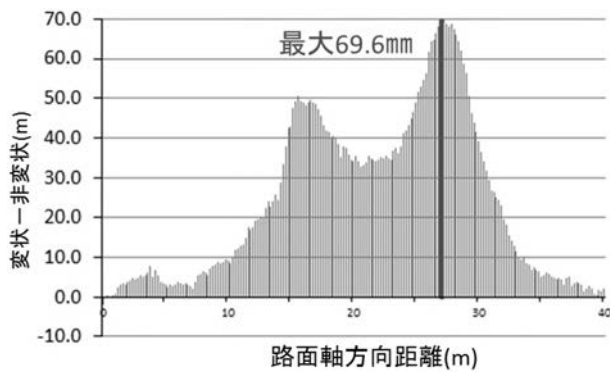


図-17 隆起ありとなし区間<中心線>の標高差

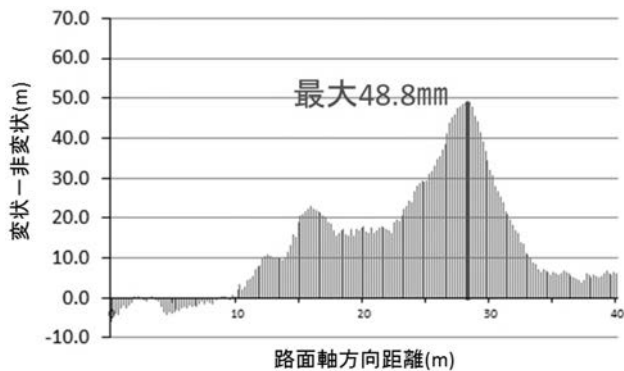


図-18 隆起ありとなし区間<走行車線>の標高差

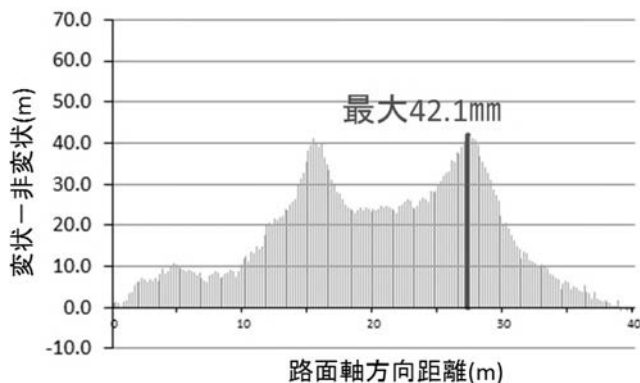


図-19 隆起ありとなし区間<追越車線>の標高差

様に、走行車線および追越車線における隆起量の最大値を求めると、それぞれ48.8mm、および42.1mmとなった(図-18および図-19)。

e) 変状区間の摺り付け勾配

つぎに摺り付け勾配の基準を参考にして変状区間の考察を行う。試算例として中心線のみを取り上げる。変状区間縦断面と非変状区間縦断面との差を参考にして6区間に分け、それぞれの区間における縦断勾配を求めた。隣り合う区間ごとに縦断勾配の代数差を求めることにより摺り付け勾配を算出した。たとえば、縦断勾配が2.64%から1.82%に変化する場合の摺り付け勾配は $|2.64 - 1.82| = 0.82$ (%)となる。算出結果を図-20に示す(図中の赤字が摺り付け勾配、黒字が各区間の縦断勾配を示す。また、下り勾配を正とする)。

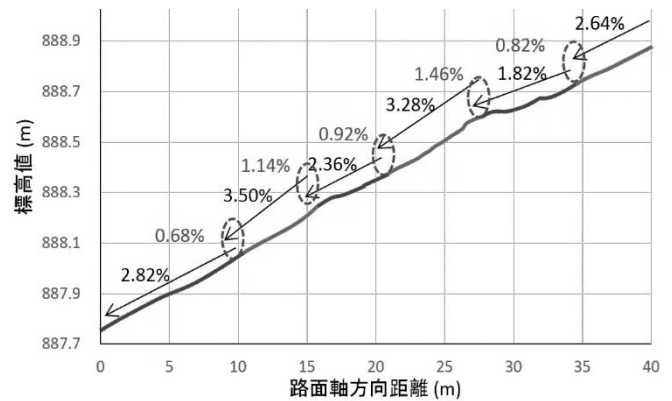


図-20 隆起区間<中心線>の摺り付け勾配

本図に示す最も急な箇所の摺り付け勾配が1.46%であり、前述の摺り付け勾配の基準値6%(当該トンネルは寒冷地)を下回った。縦断勾配においても最も急な箇所が3.28%であり、前述の縦断勾配の基準値も下回っている。また、隆起が認められている箇所でも同図中の矢印の向きから判断すれば、全体として下り勾配が確保されている。以上の結果から判断すれば走行性能に大きな支障をきたすことはないと考えられる。しかしながら、非変状区間縦断面との差や、勾配の変化からみて隆起している可能性が高いこと、また、トンネル自体がグリーンタフ分布地域に位置しインバート未設置区間であることから、引き続き監視を続けなければならないと示唆される。

5. おわりに

本研究ではトンネルの維持管理の効率化を図るために、走行型レーザ計測により得られた三次元点群データからトンネル路面状態の可視化を行った。

走行型レーザ計測のひとつであるMMSにより計測したトンネルの三次元点群データから路面のみのデータを抽出し、三角網と等高線を作成し、2種類の段彩図を用いることにより、路面変状の可視化を実現することができた。また、2種類の段彩図により、わだちや路盤隆起の路面性状を可視化することができた。ひとつの目安となる基準を設け、これにより簡易な評価方法を示し、それによりある程度の評価が可能であることも明らかにした。

ただし、MMSによる計測結果を水準測量による結果と照合したところ、変状区間の範囲は一致したが、標高値に差が生じたことが別途検討した結果明らかとなっている。このことから、GPS受信不可の環境下であるトンネル内でのMMSの使用は、正確な標高値あるいは絶対

座標値による評価はできない。しかし、路面凹凸のように相対値で評価可能な路面状態を把握する
分には、本研究のような簡易な評価手法でも実用に耐えうると考える。

謝辞：本研究遂行に際し、当時 首都大学東京都市環境学部都市基盤環境コース4年 近藤紹仁君（現 株式会社大林組）には多大な貢献を頂いた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 建設コンサルタント協会 関西支部：公共土木施設の維持管理に関する研究委員会報告書 第2編 道路分科会「3. 今後の道路トンネル点検のあり方について」, pp.1-4, 2015.
- 2) 国土交通省 道路局 国道・防災課：道路トンネル定期点検要領, pp.8-12, 2014.
- 3) 水口尚司, 大西有三, 西山哲, 西川啓一, 下澤正道, 石村勝伸：道路トンネルにおける画像及びレーザデータを用いたマネジメント手法の研究, 土木学会論文集 F2 (地下空間研究), Vol.71, No.1, pp.20-30, 2015.
- 4) 菅原健太郎, 大窪克己, 土門剛, 三ツ谷洋司, 蔣宇静：矢板工法で建設されたトンネルの移動体レーザスキャニングによる覆工形状計測, 第26回トンネル工学研究発表会, 論文I-7, 2016.
- 5) 石川貴一郎：屋外環境下におけるGPSを用いた移動式三次元計測システムに関わる研究, 早稲田大学大学院, 博士論文, 2009.
- 6) 森石一志, 中村博康, 渡邊一弘：三次元点群データを用いた新たな路面評価手法の検討, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.69, No.3, pp.I_9-I_16, 2013.
- 7) 森石一志, 中村博康, 渡邊一弘：実路における三次元点群データを用いた路面評価手法の実用性の検討, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.70, No.3, pp.I_33-I_40, 2014.
- 8) 土木学会 岩盤力学委員会 トンネル変状メカニズム研究小委員会：トンネル変状のメカニズム, pp.48-49, 2003.
- 9) 電子政府の総合窓口 e-GOV：道路構造令, 2011.12. <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S45/S45SE320.html> (2016.11.10 参照)
- 10) 東日本高速道路株式会社：設計要領 第一集 舗装編, p.135, 2015.
- 11) 東日本高速道路株式会社：設計要領 第四集 幾何構造編, p.70, 2015.