## トンネル切羽前方探査による地山等級の三次元可視化

板場建太 中岡健一 森 拓雄

# Three-dimensional Visualization of Ground Classification Ahead of a Tunnel Face by a Geological Exploration System

Kenta Itaba Kenichi Nakaoka

Takuo Mori

## Abstract

For a safe and rational mountain tunnel excavation, the geology ahead of the tunnel face must be captured in detail. The Obayashi Corporation has developed Tunnel Navi<sup>®</sup>(TN), focusing on the drilling velocity of a non-core drilling exploration. However, the ground classification obtained by TN is based on one-line exploration results. Recently, a site has been developed that performs three TN lines for obtaining the geology ahead of a tunnel face in more detail than by the conventional method. The Obayashi Corporation has developed a space interpolation system by a Gaussian regression process, capable of visualizing the results of three or more TN runs in three dimensions. Thus, the geological soft points ahead of a tunnel face can be revealed more easily by geological exploration than before.

#### 概 要

山岳トンネル工事において,掘削作業の安全確保と支保工の合理的な選定のために切羽前方の地山情報の把 握は重要である。地山情報はノンコア削孔などの前方探査により把握できる。大林組は削孔速度に着目した独自 のノンコア削孔検層「トンネルナビ<sup>®</sup>」を開発した。これまで,多くの前方探査は1本の探査ボーリング孔の結果 (切羽断面内の1点)から前方地山情報を代表させて示した。近年,より詳細な前方地山の把握を目的に1回の前方 探査で,3箇所の削孔を行う現場がある。筆者らは3本以上の探査ボーリング孔の結果をガウス過程回帰による空 間補間で三次元的に可視化させるシステムを開発した。本システムは前方探査の評価に基づく前方地山の予測 結果を色の違いで示せる。また,地質の変化や局所的な弱部・地山等級を含む断面を任意に表示でき,掘削作業 者や発注者とのより迅速な地山情報の共有を可能にした。

#### 1. はじめに

近年,ICT機器の発展に伴い,これまで処理に時間を要 していた三次元設計データや三次元測量データなどのビ ックデータ管理がより容易となった。その結果,ビック データによる地山情報の「可視化」も,現場での施工判 断を一助する手法として注目されるようになった<sup>1,2</sup>。

山岳トンネル工事では、掘削対象の前方地山の情報が 詳細に得られるほど、掘削工事は安全・円滑に進められ るが、その地山情報を把握することは難しい。また、前 方の地山情報を詳細に把握するために前方探査を実施し ていても、予想と異なる脆弱な地質や突発的な湧水に遭 遇し、掘削の進行が極端に低下したり、地山が崩落する 肌落ち災害が発生したりすることもある。これらを受け、 厚生労働省は肌落ち災害防止ガイドラインを2016年に策 定するなど掘削作業における安全への関心は高い<sup>3</sup>。

大林組は、切羽前方の地質特性を定量的に評価するため、ノンコア削孔切羽前方探査技術「トンネルナビ<sup>®</sup>」を 開発した<sup>4</sup>。トンネルナビは2019年3月時点で、全国の39 箇所の山岳トンネル現場の施工管理に適用されている。 トンネルナビの結果による地山情報の予測は,80%以上 適合することが確認されており,他の同種の方法に比べ て信頼性が高い<sup>5),6),7)</sup>。トンネルナビの地山情報は一次元 的な折れ線グラフで出力される。その折れ線グラフは, 1本のノンコア削孔探査の結果から,前方地山の地山情報 を代表させる。

最近,より詳細な地山情報の把握を目的とし,Fig.1の ように,切羽の前方探査でトンネルナビを3本実施する現 場も見られるようになった。しかし,三つのトンネルナ ビの折れ線グラフから地山情報を三次元的に把握するこ とは困難である。そこで筆者らは、3本のトンネルナビの 結果をガウス過程回帰により空間補間し、三次元的に可 視化させるシステムを開発した。このシステムにより、 トンネルナビから求まる前方地山情報の予測結果を,前 方探査領域付近の地山全体の3Dモデルによる色の違い (以下、3Dコンターと称す)で表示することが可能となっ た。また、3Dコンターでは、従来の折れ線グラフ表示に 比べ、前方地山の地質変化箇所や局所的な弱部を視覚的 に容易に判断できるようになった。

本報告では、開発した三次元可視化システムから出力 される3Dコンターを用いて、掘削作業関係者の間で切羽 前方の地山情報を迅速に共有した実例を示す。加えて、 現場の安全管理や、支保選定の合理化への3Dコンターの 利用方法について述べる。

## 2. トンネルナビの概要

大林組は、フィード圧(ノンコア削孔の時の押付け圧) の影響を考慮した削孔速度の変換解析システム「トンネ ルナビ」を開発した<sup>4,5</sup>。このシステムは、削孔データか ら得られた削孔速度とフィード圧の相関を用いて、フィ ード圧を一定にした場合の仮想の削孔速度を求め、その 削孔速度を正規化・無次元化した値「正規化削孔速度比 (以下, NVRと称す)」を評価する<sup>4)</sup>。

トンネルナビの結果から算定されたNVRに対応する 道路トンネルの地山等級をTable 1に示す。地山等級の評 価については、NVRの値が0.05変化するごとに地山等級 は1ランク変化と評価する。この増減パターンは、既往の 研究成果から切羽観察による地山の硬軟の変化と良く対 応し、断層破砕帯、亀裂集中帯、風化・熱水変質帯の分 布や掘削実績による地山等級の変動とも良く対応するこ とが確認されている<sup>4-7</sup>。

#### 3. 三次元可視化システムについて

#### 3.1 システム概要

今回開発した三次元可視化システムは、3本のトンネル ナビから得られたNVRを、トンネルの縦断方向、横断方 向および平面方向の各断面上にコンターを表示させ、こ れらを組み合わせて地山情報の3Dコンターを描画する 機能を有する。

三次元可視化システムによる空間補間領域の概要図を Fig. 2に示す。空間補間領域は、前方探査区間を包括する ように、トンネルの縦断方向、横断方向および平面方向 の距離を任意で設定した領域である。表示させる断面間 隔についても任意の設定が可能である。

ここで, NVRのコンターの凡例は,地山の硬軟の情報 を示す。軟質地山を暖色側で,硬質地山を寒色側で表現 し,その間は遷移領域とした。

例えば、出力する3Dコンターの間隔を10mと設定した 場合を考える。Fig. 2の空間補間領域の概要図は、一番手 前の3Dコンター断面から10m掘削すると、地山の軟質部 が切羽に現れると予測できる。この軟質部については、 その後も10m以上続き、地山の左側下部へ遷移していく と予測される。このように、掘削作業時に留意が必要な 区間を迅速に読み取って、その情報を関係者間で共有す ることができる。

この3Dコンターについては、市販されている設計支援 ツール(Auto CAD<sup>®</sup>など)での描画が可能であり、トンネ

## Table 1 トンネルナビの地山等級

Ground Classification of Tunnel Navi

正規化削孔速度比	地山等級
( NVR )	(道路トンネル)
0.50~	DⅢ
0.45~0.50	DII
0.40~0.45	D I
0.35~0.40	СП
0.30~0.35	C I
a 0.20	B



Fig. 1 トンネルナビ概要図(3本実施) Schema of Tunnel Navi Using 3 Sets



Fig. 2 空間補間領域の概要図 Schema of Space-interpolation Area

ル工事現場への導入は容易である。

## 3.2 ガウス過程回帰

三次元可視化システムでのNVRの空間補間には,ガウ シアンカーネルを用いたガウス過程回帰を適用した<sup>8-12)</sup>。 この方法を用いることで,前方探査領域の任意の位置の 物理量を補間することができる。また,任意の平面上に, 格子状に補間し、容易に3Dコンターを描画できる。

座標 $x_i$ (i = 1, 2, ..., N)の標本地点における物理量 $z_i$ から, 観測されていない地点 $x_0$ の量 $z_0$ を推定する方法を以下に 述べる。

本方法で仮定されている前提を以下に示す。

- ・観測前においては、物理量は正規分布に従う確率変 数であり、観測値は偶然得られた値である。
- ・観測前における各地点の平均と分散は同じとする。
- ・二つの観測点の共分散は距離に依存し、距離を変数 としたカーネル関数で表される。

多変量ガウス分布の確率密度関数は式(1)により表される<sup>11)</sup>。

$$f(\mathbf{Z}) = \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi}\right)^{N} \sqrt{|\mathbf{\Sigma}|}} \exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{Z} - \boldsymbol{\mu})^{T} \boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\mathbf{Z} - \boldsymbol{\mu})\right]$$
(1)

$$\boldsymbol{Z} = [\boldsymbol{z}_1 \cdots \boldsymbol{z}_N]^{\mathrm{T}}, \quad \boldsymbol{\mu} = [\boldsymbol{\mu}_1 \cdots \boldsymbol{\mu}_N]$$
(2)

μ<sub>i</sub>は観測点iにおける平均である。また、Σは分散共分
 散行列で式(3)により表される。

$$\boldsymbol{\Sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \cdot & \sigma_{1N} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \sigma_{N1} & \cdot & \sigma_{NN} \end{bmatrix}$$
(3)

ここで, Σの対角成分σ<sub>ii</sub>は観測点iの分散であり,それ 以外の成分σ<sub>ij</sub>は観測点iとjの間の共分散である。次に, σ<sub>ij</sub>は観測点iとjの距離h<sub>ij</sub>を変数としたカーネル関数によ り計算される。カーネル関数は、特徴空間における内積 をデータから直接計算できる関数である。本研究では代 表的なカーネル関数の一つである式(4)に示すガウシア ンカーネルを用いた。この関数では、h<sub>ij</sub>が小さくなれば σ<sub>ij</sub>が大きくなることから,観測点同士の距離が短いほど, 両者の物理量の相関が高くなることを表している。

$$\sigma_{\rm ij} = \exp\left(-\frac{h_{\rm ij}^2}{2\sigma^2}\right) = \exp\left(-\gamma h_{\rm ij}^2\right) \tag{4}$$

ここで、 $\sigma^2$ および $\gamma$ は計算用パラメータである。i = jの 場合は $h_{ii} = 0$ で、各観測点における分散となる。

次に、 $\mu_i(i = 0 \sim N)$ が同じで既知の値 $\mu$ であるとすると、  $z_1 \sim z_N$ に観測されていない地点の物理量 $z_0$ (スカラー)を 加えた密度関数の式(1)は $z_0$ を変数とする関数になる。こ こでは、 $\mu$ は全ての観測値の平均とする。次に、

$$\boldsymbol{\Sigma}^{-1} = \boldsymbol{\Lambda} \tag{5}$$

とおき,

$$\boldsymbol{\Sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{00} & \boldsymbol{\Sigma}_{0b} \\ \boldsymbol{\Sigma}_{b0} & \boldsymbol{\Sigma}_{bb} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\Lambda} = \begin{bmatrix} \alpha_{00} & \boldsymbol{\Lambda}_{0b} \\ \boldsymbol{\Lambda}_{b0} & \boldsymbol{\Lambda}_{bb} \end{bmatrix}$$
(6)

とおくと、公式より式(7)が得られる。ここに、 $\Sigma_{0b}$ は補間 を行う $x_0$ における物理量とその他の観測点との共分散を 表す1行N列の行列となる。 $\Sigma_{b0}$ はその転置行列である。

$$\boldsymbol{\Sigma}^{-1} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{M} & -\boldsymbol{M}\boldsymbol{\Sigma}_{0b}\boldsymbol{\Sigma}_{bb}^{-1} \\ -\boldsymbol{\Sigma}_{bb}^{-1}\boldsymbol{\Sigma}_{b0}\boldsymbol{M} & \boldsymbol{\Sigma}_{bb}^{-1} + \boldsymbol{\Sigma}_{bb}^{-1}\boldsymbol{\Sigma}_{b0}\boldsymbol{M}\boldsymbol{\Sigma}_{0b}\boldsymbol{\Sigma}_{bb}^{-1} \end{bmatrix}$$
(7)
$$\boldsymbol{M} = \left(\boldsymbol{\sigma}_{00} - \boldsymbol{\Sigma}_{0b}\boldsymbol{\Sigma}_{bb}^{-1}\boldsymbol{\Sigma}_{b0}\right)^{-1}$$
(8)

また,

$$\boldsymbol{Z} - \boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{z}_0 - \boldsymbol{\mu} \\ \boldsymbol{Z}_{\mathrm{b}} - \boldsymbol{\mu} \end{bmatrix}$$
(9)

とおくと,式(1)の指数部をΔ<sup>2</sup>とし,式(10)で表される。

$$\Delta^{2} = -\frac{1}{2} (\boldsymbol{Z} - \boldsymbol{\mu})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\boldsymbol{Z} - \boldsymbol{\mu})$$
$$= -\frac{1}{2} \Big[ \begin{pmatrix} z_{0} - \boldsymbol{\mu} \\ \boldsymbol{Z}_{b} - \boldsymbol{\mu} \end{pmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} \alpha_{00} & \boldsymbol{\Lambda}_{0b} \\ \boldsymbol{\Lambda}_{b0} & \boldsymbol{\Lambda}_{bb} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} z_{0} - \boldsymbol{\mu} \\ \boldsymbol{Z}_{b} - \boldsymbol{\mu} \end{pmatrix} \Big]$$
$$= -\frac{1}{2} \Big\{ \alpha_{00} \Big[ z_{0} - \big( \boldsymbol{\mu} - \boldsymbol{\Lambda}_{0b} \alpha_{00}^{-1} (\boldsymbol{Z}_{b} - \boldsymbol{\mu}) \big) \Big]^{2} + C \Big\}$$
(10)

ただし、Cは式(11)で表される。

$$C = -2\Lambda_{0b}(\mathbf{Z}_{b} - \boldsymbol{\mu})\boldsymbol{\mu}$$
  
-[\mu - \Lambda\_{0b}\alpha\_{00}^{-1}(\mathbf{Z}\_{b} - \mu)]^{2} (11)  
+(\mathbf{Z}\_{b} - \mu)^{T}\Lambda\_{bb}(\mathbf{Z}\_{b} - \mu)

Cは観測値と平均値,観測点間の共分散から計算できる定数である。そのため、式(10)の $\alpha_{00}$ が係数となっている平方の項が0となるときに、最も確率密度が高くなる。そのときの $z_0$ が $x_0$ における条件付きの平均値 $\mu_{0|b}$ であり、求める補間結果となる。 $\mu_{0|b}$ は式(12)により求められる。

$$\mu_{0|b} = \mu - \Lambda_{0b} \alpha_{00}^{-1} (\mathbf{Z}_{b} - \boldsymbol{\mu})$$
(12)

式(7)と式(8)より式(13)が得られる。

$$\mu_{0|b} = \mu + M \Sigma_{0b} \Sigma_{bb}^{-1} M^{-1} (\boldsymbol{Z}_{b} - \boldsymbol{\mu})$$
  
$$= \mu + \Sigma_{0b} \Sigma_{bb}^{-1} (\boldsymbol{Z}_{b} - \boldsymbol{\mu})$$
(13)

式(13)の $\Sigma_{0b}$ と $\Sigma_{bb}$ は観測点間の距離から求められるため、 $\mu_{0lb}$ を計算できる。

#### 4. 三次元可視化システムの試行

#### 4.1 試行現場の概要

当該現場の地質は,輝石安山岩溶岩が主体であり,部 分的に自破砕質溶岩および凝灰角礫岩,凝灰質砂岩を挟 むと予想された。また、自破砕安山岩溶岩の一部はマグ マが水に急冷されてできた細かい砕屑粒子を主体とする ハイアロクラスタイト状を示し、多孔質で脆い部分を有 する可能性もある。そのため、掘削作業中の湧水も懸念 された。地質縦断図における地山分類は全体的にDIパ ターンで、地質良好部はCIIパターン、坑口から100m程 度はDIIパターンである。また、推定されている亀裂帯は 熱水変質を被っている可能性があり、岩質の劣化が懸念 された。

掘削中の切羽面に対して傾斜している断層破砕帯部の 分布や切羽前方の地山情報を正確に把握せずに掘削する と断層破砕帯部の前後区間や局所的に出現する脆弱区間 などにおいて、支保部材の耐力が不足し、変状が生じる 可能性がある。そのため、この現場は切羽前方の地山情 報を詳細に把握することを目的に、1断面でトンネルナビ による前方探査を3箇所実施している。

#### 4.2 3Dコンターの出力例と活用方法

切羽前方地山の30m区間における3本のトンネルナビ (左側:Fig. 3の(a),中央部:同図の(b),右側:同図の(c) 参照)により,紺色の折れ線グラフ(NVR)と,赤色の折れ 線グラフ(平滑化したNVR)が得られる。これらから求め たFig. 3の緑色の折れ線グラフが地山等級の予測結果で ある<sup>4)</sup>。この地山等級の予測結果を三次元可視化システ ムにより,3Dコンターとして出力させた結果をFig.4に 示す。

3本のトンネルナビ結果を3Dコンターで鳥瞰的に示す ことで、予測した軟質部などの地山不良部が視覚的に判 別しやすくなり、掘削作業関係者との地山情報の共有が 容易となった。また、現場へのヒアリングから、以下の ように使用する場合の有効性が明らかになった。

4.2.1 掘削作業の安全管理に用いる場合 3Dコン ターは切羽前方地山の不良部や地山等級を視覚的に示し, 判断しやすくするものである。また,前方地山の3Dコン ターの鉛直断面数も任意に変更することが可能であり, コンターの閾値も細かく設定することで,より詳細に地 山の状況を可視化できる。例えば,Fig. 5の(a)に示す3D コンターから,切羽前方地山の掘削領域の硬軟が容易に 判別可能であることがわかる。また,鉛直断面のコンタ 一出力例と該当部の切羽写真例を同図の(b)と,同図の(c) に示す。出力コンターの表示は,切羽写真に示される地 山の硬軟の遷移状況を概ね再現している。

現場の地山の軟質部は、風化や粘土化している可能性 が高く、掘削作業における地山崩落のリスクが高まって いた。Fig. 5に示す3Dコンターを用いることにより、地 山の軟質部を予見するなど、掘削作業関係者と前方地山 の情報共有を効率よく図ることができ、危険予測の面か ら掘削作業の安全性の向上に寄与できた。

4.2.2 **支保選定の補助に用いる場合** 3Dコンター の色を変更させる閾値は任意に変更することが可能であ り, Fig. 6の(a)のように*NVR*のコンターを地山等級に整





Fig. 4 トンネルナビ3Dコンター Three Dimension Contour of Tunnel Navi





合させて表示できる。この表示を行うことで、3Dコンタ ーの色の境界が、地山等級に基づく支保パターンの変化 箇所となる。また、鉛直断面の間隔を5mと調整すること で、切羽前方地山の支保変化点を見やすく示すことがで きる。鉛直断面のコンター出力例と該当部の切羽写真を 同図の(b)と(c)に示す。コンターでは鉛直断面の左側に D III相当の評価の部分、右側にD I 相当の評価の領域が示 され、両者の間にD II 相当の領域が分布している。これら の分布傾向は切羽で確認された地山等級と概ね整合して おり、前方地山の支保パターンを協議する際の判断材料 に3Dコンターを活用でき、今後の掘削作業における支保 選定の効率化が期待できる。

Three Dimension Contour (Support Select Assistance)

#### 4.3 3Dコンターの活用結果

三次元可視化システムを当社のトンネル現場で試行した。発注者や現場職員のヒアリング,アンケートも実施し,その結果より,切羽前方の地山情報を視覚的に容易に把握でき,掘削作業関係者との地山不良部などの情報 共有がしやすくなったという意見が多かった。

3Dコンターの閾値を地山等級と整合させて表示させ

ることにより,3Dコンターの色変化の境界が支保パターンの変化点となり,支保変化位置を協議する際の参考となるようにした。以上より,3Dコンターは支保選定の合理化,迅速化に資することも確認した。

## 5. おわりに

## 5.1 まとめ

山岳トンネルの施工で活用されているトンネルナビに よる切羽前方の地山情報を視覚的に容易に把握し,共有 しやすくするための三次元可視化システムを開発した。 また,三次元可視化システムを現場で試行し,掘削作業 者や発注者,現場職員とのヒアリングを実施した。

得られた知見を以下に列挙する。

- 三次元可視化システムにより出力される3Dコン ターにより、切羽前方地山の硬軟の分布を可視化、 予測評価することができ、地山情報の共有が容易 になった。
- 3Dコンターの表示方法において、前方地山評価用の鉛直断面の間隔を短くすることや、NVRのコンターのグラデーションを細かく設定することで、地山の軟質部、弱部の詳細な描画が可能であり、掘削作業の安全管理への活用が期待できる。
- 3) 3Dコンターの表示方法において、NVRのコンターの閾値を地山等級の変化に整合させると、支保パターンの変化箇所が明確となり、支保選定の合理化、迅速化に資することができる。

## 5.2 今後の展望

三次元可視化システムの今後として、まず、コンピュ ータジャンボにより得られたデータを三次元可視化シス テムに適応していきたいと考えている。コンピュータジ ャンボは削孔座標も併せて記録されるため、本システム への導入が比較的容易である。また、ロックボルト孔の 削孔データと前方探査から得られた地山予測情報を組み 合わせることにより、より情報量の多い前方探査が可能 になる。このように、前方探査のさらなる高精度化に向 けた取組みの一助にしたいと考える。そして、CIMでの 施工データの管理に3Dコンターを導入し、理解しやすい 山岳トンネルの施工データの蓄積のためにも活用してい きたいと考えている。

## 参考文献

- 松井保 監修, (一財)災害科学研究所 トンネル調査 研究会 編:トンネル技術者のための地盤調査と地 山評価, 鹿島出版会, 255p., 2017.1
- 畑浩二,杉浦伸哉,後藤直美:山岳トンネルにおけるCIMの開発,大林組技術研究所報, No. 78 pp. 1-7, 2014
- 厚生労働省:山岳トンネル工事の切羽における肌落 ち災害防止対策に係るガイドライン, 10p., 2016.12
- 4) 桑原徹,畑浩二,稲川雄宣,平川泰之:変換解析シ ステムによるノンコア削孔トンネル切羽前方予測 技術,トンネル工学論文集第18巻,pp. 1-10,2008.11
- 5) 稲川雄宣,畑浩二,桑原徹,中岡健一:ノンコア削 孔による切羽前方予測技術の基礎的研究-大型花 崗岩供試体を利用した削孔実験-,トンネル工学報 告集第16巻, pp.107-112,2006.11
- 6) 桑原徹,畑浩二,林下敏則,小野寺仁,田中幸一: 前孔速度解析システムによる花崗岩地山でのトン ネル切羽前方探査,土木学会第64回年次学術講演会, VI-289, pp. 577-578, 2009.9
- 7) 桑原徹,畑浩二,玉井昭雄,田湯正孝:ノンコア削 孔トンネル切羽前方探査による地山強度比の推定, トンネル工学報告集第19巻, pp. 145-156, 2009.11
- 8) Math Works<sup>®</sup>, MATLAB ドキュメンテーション: https://jp.mathworks.com/help/stats/fitrgp.html, 2018.7.9閲覧
- 9) 松井和子:ガウス過程の基礎,統計数理研究所公 開講座(ガウス過程の基礎と応用),2015.3
- 10) 金子弘昌:ガウス過程による回帰(Gaussian Process Regression GPR), 2017.8
- 持橋大地、大羽成征:ガウス過程と機械学習,機械 学習プロフェッショナルシリーズ 講談社,233p., 2019.3
- 12) 高阪宏之: クリギングとその地理的応用,日本大学 文理学部自然科学研究所研究紀要, No. 34, 1999