

# 画像による山岳トンネルの切羽地質評価技術の開発

## AIが切羽評価の全項目を自動評価

鶴田 亮介・谷口 翔

ICTにより山岳トンネル工事の生産性を大幅に高める取組みの一環として、山岳トンネルの切羽地質評価の全項目を画像のみからAIが自動的に評価する「切羽地質画像評価システム」を開発した。

山岳トンネルの切羽地質評価に特化した岩種別のAIアルゴリズムを開発し、切羽評価の実施と評価結果の出力までを自動化することで、短時間かつ、簡易な操作でトンネル切羽の地質評価を可能とした。開発したシステムをトンネル施工現場に導入し、システムの運用と検証を行った。本稿では、本システムの概要と現場での運用結果について報告する。

キーワード：山岳トンネル、岩判定、切羽、AI、地質評価

### 1. はじめに

山岳トンネルは、地中深くに構築されることから、事前の設計段階の調査で、正確な地質状況を正確に把握するのは難しい。そこで、施工中に、トンネル切羽を直接観察して地質を確認・再評価し、切羽の状況に応じた最終的な支保パターンを確定する作業が行われる。このように、切羽での地質評価は重要なものであるが、実際の施工現場では、トンネルの掘削作業の合間を縫った短い時間で、目視観察を中心とした地質評価が行われており、評価の精度や定量化に課題がある。このような課題を解決するために、近年、トンネル切羽の地質状況についてAIを用いて評価する手法が種々提案されており、その一つに、AIの画像認識技術を用いてトンネル切羽画像から切羽岩盤の工学的特性を評価する手法がある。例えば、岩盤の工学的特性によって弾性波速度が変化することに着目した手法<sup>1)</sup>や、切羽画像と穿孔エネルギーとの関係に着目した手法などが提案されている<sup>2)</sup>。

本検討では、現場で施工管理として行っている目視観察での切羽観察で取得した評価項目別の評価区分と切羽画像をAI学習の教師データとした。画像と評価区分の関係を学習させた後に、AIが与えられた切羽画像から評価項目別に評価区分を推定する。本稿では、AIによる評価システムの概要と、導入したトンネル施工現場での運用と検証結果について報告する。

### 2. AIによる切羽評価システム

#### (1) 評価の対象

今回の検討に使用した切羽評価の項目は、山岳トンネルの切羽評価様式として一般的な国土交通省近畿地方整備局の切羽観察様式に準拠したものである。切羽観察には全てで11項目の評価項目があり、各評価項目は5～6個の評価区分を持つ。評価項目の一覧を表1に示す。

表1 切羽評価項目一覧

	評価項目
A	切羽の状態
B	素掘り面の状態
C	圧縮強度
D	風化変質
E	割れ目の頻度
F	割れ目の状態
G	割れ目の形態
H	湧水
I	水による劣化
J	割れ目の方向性（縦断方向）
K	割れ目の方向性（横断方向）

AI学習の際の教師データには、切羽評価11項目の評価区分を説明変数に、切羽写真を目的変数とした。AI学習モデルを構築する際には、目視による切羽観察の各項目の評価区分を正解とした。

### (2) AI の学習手法

本検討の機械学習の手法には、深層学習を使用した画像分類手法であるNFNet (Normalization-Free Net)を採用した。NFNetは英国Deep Mind社から2021年に発表された最新の画像認識モデルである。画像認識において常識となっているバッチ正規化を取り除くことにより、評価精度は従来の最高水準の手法と同水準を維持しながらも、訓練が8.7倍速くなっている<sup>3)</sup>。バッチ正規化を採用したAIモデルであるResNet (レズネット)は深層学習の層が飛躍的に深まり、画像認識の精度が大きく向上した。しかしバッチ正規化には、①計算量が増え大きなメモリ容量を必要とする、②学習時とテスト時でモデルの挙動が変わる、③1つ1つのデータ間の独立性が壊れる、④小さいバッチサイズでは機能しないといった欠点がある。①は現場に設置した一般的なPCでの運用上問題があり、④は切羽のような細かな特徴量を持つ画像の評価に対して不利であった。NFNetはバッチ正規化を取り除くことにより、これらの課題を解決している。

### (3) AI の教師データ

教師データ作成の際には汎用の画像編集ソフトを利用し、切羽写真をトレースして切羽の範囲を評価区別の色に塗りつぶしたデータを作成した。1切羽につき11個の評価項目毎に1枚、合計11枚のラベル付けデータを作成した。切羽写真と写真から作成したラベル付けデータの例を図-1に示す。

教師データとして各評価項目の評価区分を使用する際には、切羽観察で切羽を天端・左肩・右肩の3つの部位に分けて切羽評価を行っているため1評価項目あたり3データ、1切羽当たり合計33データを学習に使用した。

手元にある全てのデータを教師データとして使用するのではなく、なるべく各評価区分の教師データ数が

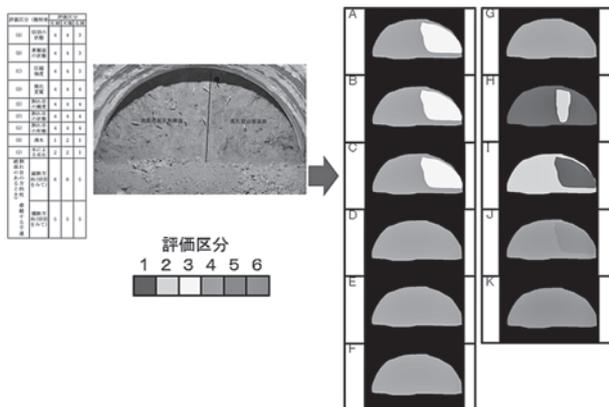


図-1 AI教師データラベル付けの例

同じ比率になるように、データとして使用する切羽の選別を行った。

例として示す花崗岩が分布するトンネルでは102切羽の3,366データ、凝灰岩が分布するトンネルでは144切羽の4,752データを教師データとして採用した。

目的変数として使用する切羽画像については、施工機械や作業員の影が写り込んでいないものを選別し、機械学習の前に色見本を用いた色補正処理を行った。

### (4) 作成したAI評価モデルの精度

構築したAI評価モデルに対して、図-2のように、汎化性能を評価する統計的な手法である交差検証 (クロスバリデーション)を用いて、教師データを学習用とテスト用に分割した上で推定精度の検証を行った。分割した学習用データを用いて機械学習を行った後に、テスト用データを用いて評価区分の推定を行った。花崗岩トンネルデータに対する推定精度の結果を図-3に、凝灰岩トンネルデータに対する推定結果を図-4に示す。

図中のグラフでは横軸に11個の切羽評価項目を、

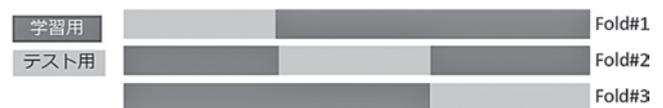


図-2 学習用・テスト用データ分割イメージ

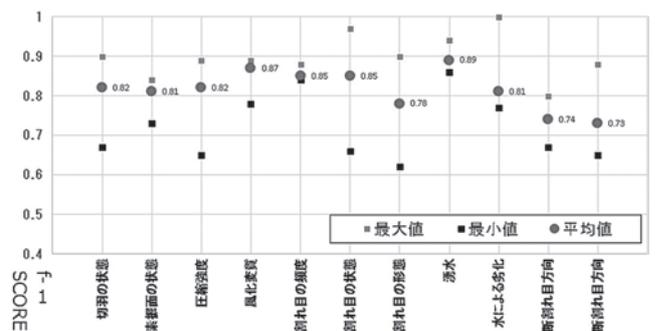


図-3 花崗岩トンネルデータの推定精度

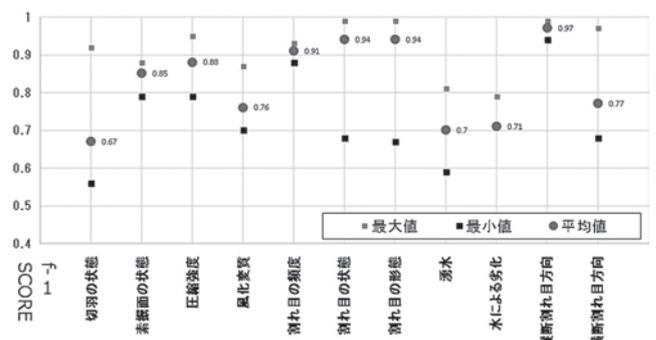


図-4 凝灰岩トンネルデータの推定精度

縦軸に評価区分の推定精度を示している。精度の指標として、統計解析において精度を測る指標であるF値(F-SCORE)を用いている。F値とは、正しく予測できた割合を示す適合率と、誤回答の割合を示す再現率の調和平均であり、2つの指標をまとめて評価する指標となる。2つの指標のバランスが良く、値が1に近いほど推定精度が高いと評価できる。各項目の評価区分内での推定精度は異なるため(例えば項目Aの評価区分1と2の区分精度と、評価区分2と3の区分精度は異なる)、項目別に最も低い推定精度と高い推定精度、および平均推定精度をグラフ中に記している。検証の結果、花崗岩トンネルについては全ての評価項目で0.7以上のF値が得られた。凝灰岩トンネルについてはA:切羽の状態の項目以外では0.7以上のF値が得られた。

### 3. システムの現場への導入と運用

#### (1) 工事概要

本試行を実施した現場と地質の概要を以下に示す。システムを導入した工事現場は東北地方の国道トンネル工事である。掘削延長は約700m、断面積約120m<sup>2</sup>で、土木学会用語辞典に拠ると超大断面トンネルに分類される。掘削方式はNATM方式で機械掘削を基本とするが、後述の安山岩溶岩などが硬質で機械掘削が困難であるため、少量の火薬を用いた発破掘削も併用している。

#### (2) 地形・地質概要

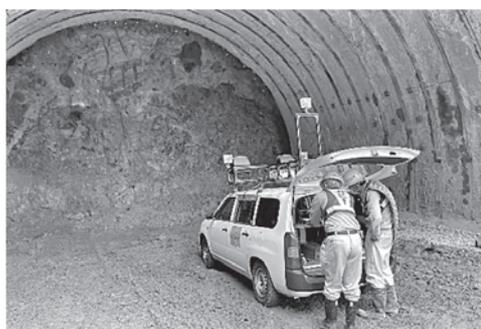
本トンネルの基盤岩は、新第三紀中新世上部の火山岩類から構成されている。火山岩類は、凝灰角礫岩と、安山岩溶岩および安産岩質自破碎溶岩から主に構成されている。これら地質体は、40度程度の傾斜で繰り返してトンネル区間に分布しており、掘削の進行に伴い、次々と異なった地質体が切羽に出現する。弾性波速度は0.8km/s～2.2km/s程度であり、DⅢ～CⅡパターンの支保が設計されている。

切羽に主に出現する凝灰角礫岩は、安山岩溶岩や安山岩質自破碎溶岩、凝灰岩など様々な種類とサイズの

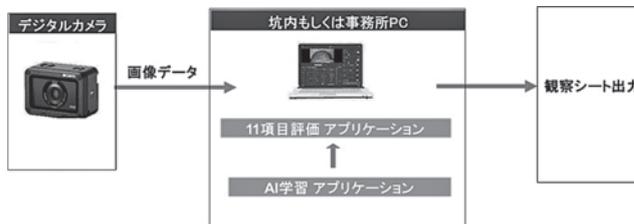
角礫を含んでおり、切羽により見た目が大きく異なっている、写真—1に施工中に撮影した凝灰角礫岩が分布する切羽の例を示す。

#### (3) システムの概要

写真—2に切羽写真の取得状況を、図—5に画像による評価システムの概略構成を示す。切羽写真の取得には、デジタルカメラと照明、操作用PCを備えた計測車両を用いた。写真の取得前に車両に搭載した消費電力2kwのハロゲン照明を用いて切羽を照射し、切羽面において充分で安定した照度を確保した。車載のPCを通じて撮影の指示と写真の取り込みを行った。



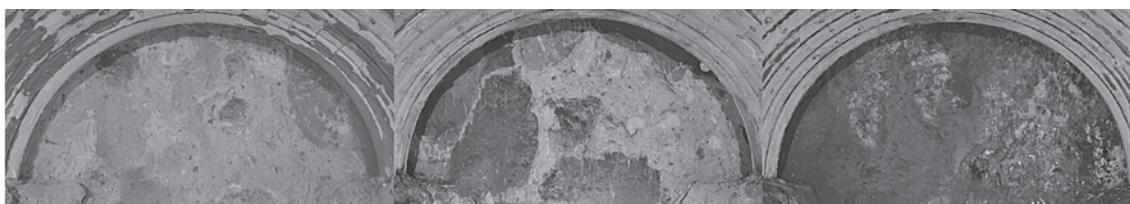
写真—2 切羽写真の取得状況



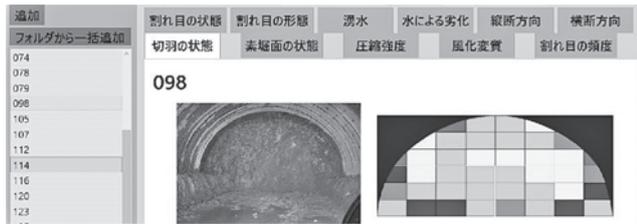
図—5 画像による評価システムの構成

評価システムはWindowsOS環境のラップトップPC内に構築した。評価システムは切羽評価アプリケーションおよびに評価に用いるAI評価モデル更新のためのAI学習アプリケーションから構成されている。現場での運用中に随時AI評価モデルを更新することが可能である。

切羽評価アプリケーションの評価時のインターフェイス画面を図—6に示す。アプリケーションのメニューから評価対象の切羽写真を選定し評価実行のポ



写真—1 凝灰角礫岩が分布する切羽写真の例



図一六 切羽評価アプリケーションの画面

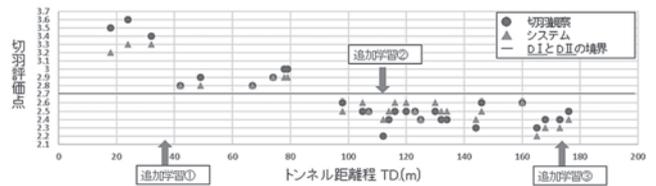
タンを押すと1分程度で全11項目の切羽評価が完了する。評価結果の帳票はメニュー上から出力することが可能である(図一七)。

### 4. システムの運用結果

「切羽地質画像評価システム」の現場運用に当たり、切羽評価アプリケーションには運用現場と類似した地質が分布する隣県のトンネル施工時に取得したデータを用いて構築した凝灰岩のAI評価モデルをあらかじめ実装した。

2021年10月より切羽写真データの取得を開始し、2022年4月時点で77切羽分の写真データを取得した。本システムによる切羽評価結果と従来の目視観察による切羽結果との精度を比較するために、システムの評価区分による切羽評価点と目視観察の評価区分による切羽評価点との比較を行った。比較表を図一八に示す。

運用当初は既存の評価モデルで使用した評価を実施し、途中から現場で作成した目視による切羽観察表を基にAI評価モデルを更新し、評価の継続的な改善を



図一八 システムによる評価点と目視観察による評価点の比較

図った。結果、運用当初はシステムと目視観察とで0.3点程度の評価点の乖離がみられたが、モデルの更新とともに評価点の乖離は減少する傾向が見られた。2回目のモデル更新以降は、評価点の乖離は0.1点程度の収まっており、従来の切羽観察手法と遜色なく判定が可能であることが確認できた。

### 5. おわりに

切羽評価項目の全11項目の評価区分を推定するAI評価モデルを、AI学習の手法としてNFNetを用いることで作成した。当アルゴリズムを組み込んだ「切羽地質画像評価システム」を開発し山岳トンネル施工現場への導入を行い、画像のみから精度良く切羽評価を行えることを確認した。現在、10種類の岩種について、切羽評価用のAIアルゴリズムを作成済みである。今後、本システムを施工管理として切羽観察を行っているすべての山岳トンネルに導入して切羽評価区分の推定に活用することで、切羽観察の省力化と支保選定の最適化に活用していく予定である。

JICMA

切羽観察表【全岩質共通】					切羽写真																																									
<p>1. 切羽観察情報</p> <p>トンネル名称: _____</p> <p>観察年月日: _____</p> <p>地点: _____</p> <p>断面番号: _____</p> <p>切羽の状況: _____</p> <p>土盛り高さ: _____</p> <p>地質地形: _____</p> <p>岩石名: _____</p> <p>湧水状況: &lt;切羽&gt; 湧水量: L/min 色: _____</p>					<p>評価区分 1 2 3 4 5 6</p> <p>色</p>																																									
<p>2. 切羽観察記録</p> <p>評価区分(目視観察)と地山の状況と一致</p> <table border="1"> <tr> <th>項目</th> <th>評価</th> <th>左側</th> <th>右側</th> </tr> <tr> <td>(A) 切羽の状況</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>(B) 崩落の状況</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>(C) 圧縮強度</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>(D) 風化実質</td> <td>1</td> <td>3</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>(E) 割れ目の深さ</td> <td>4</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>(F) 割れ目の状況</td> <td>1</td> <td>3</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>(G) 割れ目の形態</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>(H) 湧水</td> <td>3</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>(I) 水による劣化</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> </table>					項目	評価	左側	右側	(A) 切羽の状況	2	2	2	(B) 崩落の状況	2	2	2	(C) 圧縮強度	3	3	3	(D) 風化実質	1	3	3	(E) 割れ目の深さ	4	2	3	(F) 割れ目の状況	1	3	3	(G) 割れ目の形態	3	3	4	(H) 湧水	3	2	2	(I) 水による劣化	1	2	2	<p>(A) 切羽の状況</p> <p>(B) 崩落の状況</p> <p>(C) 圧縮強度</p> <p>(D) 風化実質</p> <p>(E) 割れ目の深さ</p> <p>(F) 割れ目の状況</p> <p>(G) 割れ目の形態</p> <p>(H) 湧水</p> <p>(I) 水による劣化</p>	
項目	評価	左側	右側																																											
(A) 切羽の状況	2	2	2																																											
(B) 崩落の状況	2	2	2																																											
(C) 圧縮強度	3	3	3																																											
(D) 風化実質	1	3	3																																											
(E) 割れ目の深さ	4	2	3																																											
(F) 割れ目の状況	1	3	3																																											
(G) 割れ目の形態	3	3	4																																											
(H) 湧水	3	2	2																																											
(I) 水による劣化	1	2	2																																											

図一七 評価結果の帳票出力例(国交省様式)

## 《参考文献》

- 1) 鶴田亮介, 中谷匡志: AIを活用したトンネル切羽地質状況評価システムの施工現場への適用事例, 土木学会第73回年次講演会, 2019.
- 2) 山本健太郎, 藤後廉, 小川貴弘, 長谷山美紀: トンネル切羽画像を用いたオンライン学習に基づく穿孔エネルギー推定, 土木学会論文集F3 (土木情報学), vol.77, p.22-30, 2021.
- 3) Andrew Brock, Soham De, Samuel L. Smith, Karen Simonyan: High-Performance Large-Scale Image Recognition Without Normalization, 2021-02-11, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.06171>, (参照 2021-04-01)
- 4) 谷口翔: 山岳トンネルの切羽地質情報の定量評価技術の開発: 圧縮強度, 風化度, 割れ目状態を定量評価 (特集 トンネル), 建設機械施工, vol.72, No.5, p.39-44, 2020.

## 【筆者紹介】

鶴田 亮介 (つるた りょうすけ)  
 (株)安藤・間  
 建設本部 土木設計部 基礎技術グループ



谷口 翔 (たにぐち しょう)  
 (株)安藤・間  
 建設本部 先端技術開発部 土木技術開発グループ  
 グループ長

