

山岳トンネルにおける AI を活用した切羽評価システムの開発 Development of Tunnel Face Evaluation System Using Artificial Intelligence for Mountain Tunnels

三井 善孝*

山本 悟*

Yoshitaka Mitsui

Satoru Yamamoto

山下 雅之**

Masayuki Yamashita

要 約

当社では AI（人工知能）を活用して山岳トンネルの省人化・自動化施工を目指す『山岳トンネル AI ソリューション』の構築を進めており、その要素技術として『切羽評価システム』を開発した。本システムでは、AI で切羽性状を自動評価することによる若手職員のサポート、切羽観察時間の短縮、評価の偏りの低減等を目的としている。今回、構築した AI エンジンの検証を行い、判定精度向上のためのいくつかの方策を見出した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 『山岳トンネル AI ソリューション』
- § 3. 『切羽評価システム』
- § 4. AI エンジンの検証
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

近年では、人口減少に伴う働き手不足や技術伝承の難しさをはじめとした労働に関する課題が増えてきており、その解決策のひとつとして、AI（人工知能）活用技術の開発が進められている。AI は、人の知的な振舞いを模倣するための人工的なシステムであり、答えが一意に定まらない問題を人の代わりに判断するために用いられている。特に、画像や映像等のデータ（入力）が与えられた時に人がどのような判断（出力）をしたのか、という前例（教師データ）を基に AI の判断基準を構築する「教師あり学習」を利用した事例が多く存在する¹⁾。例えば、防犯・監視の分野では、特定の挙動をする人物や事前登録された人物を監視カメラの映像から検知するシステムが開発され、従来に比べて広範囲を少人数で効率的に警備する事例が報告されている。また、ものづくりの分野では、従来は熟練者に頼らざるを得なかった設備摩耗の判断を AI に任せることで、作業員の熟練度に依存することなく生産ラインを安定化させる事例が報告されている。

* 技術研究所土木技術グループ

** 技術研究所

一方、建設分野では労働時間や人間の暗黙知に基づいた作業工程が他業種に比べて多く、AI 活用技術の適用の余地が十分に残されている。そのため、建設分野において AI 活用技術を導入することは、これらの種々の課題を解決し、生産性向上や働き方改革の実現に寄与すると考えられる。

そのような背景のもと筆者らは、工程が周期的であり土木工事の中でも作業が比較的単調と考えられるにも関わらず自動化が進んでいない山岳トンネル工事に着目し、AI を活用して山岳トンネルの省人化・自動化施工を目指すための『山岳トンネル AI ソリューション』の構築を進めている。今回はその要素技術として、切羽の性状を評価するためのシステム『切羽評価システム』を開発した。

本稿では、当社の『山岳トンネル AI ソリューション』の概要について説明するとともに、開発した『切羽評価システム』の内容や構築した AI エンジンの検証結果を紹介する。

§ 2. 『山岳トンネル AI ソリューション』

当社では、今後の取り組みのひとつに「施工の自動化等に向けた技術導入・技術開発、自律化（AI）施工技術開発」を掲げている。その一環として山岳トンネル工事における「施工・品質」、「地山評価」、「安全・健康」等の様々な課題を解決するための AI 活用技術の開発が進められており、それらの技術は『山岳トンネル AI ソリューション』と総称されている（図-1）。

例えば、「施工・品質」の分野では、重機制御や切羽作

業の判定等の、自動化の要素技術となるような AI 活用技術の開発が考えられる。また、覆工コンクリート品質評価のように、広範囲を対象に観察作業を行う場合には、AI に代行させることで効率化が期待される。

「地山評価」の分野では、切羽評価、切羽前方探査、変位予測等に関する技術の開発が考えられる。従来まで経験豊富な技術者が担っていた高度な判断を AI に実施・補助させることにより、知識の十分でない若手職員でも容易に業務を遂行できるようになると考えられる。

「安全・健康」の分野では、職員や作業員の体調を AI に判定させることで、より客観的に健康状態を把握・管理することが可能となると考えられる。また、重機や作業員をトラッキングさせ、接触の危険性がある場合に警報を出させることで、事故を防止することが可能となる。

ここに挙げたものは現時点で考えられる要素技術の一例であり、現場における需要や社会情勢の変化に合わせて開発内容を検討していく。

§3. 『切羽評価システム』

3-1 概要

『切羽評価システム』は、専用のタブレットアプリで取得された切羽写真から切羽性状を評価する AI 活用技術である。

山岳トンネル施工の安全性や施工性を確保するためには、切羽の地質状況を把握した上で、切羽の安定性や支保の妥当性を検討することが重要である。そのため、少なくとも 1 日 1 回の頻度で目視を主体とした切羽観察が実施され、「切羽の状態」や「風化変質」等の所定の項目に基づいて切羽評価が行われている。従来では経験や知識が不十分な若手職員が判断に困る場面もあったが、本システムでは AI による自動評価の結果が表示されるため、観察作業のサポートとなることが期待される。また、従来は観察時間の長さや観察者の主観による評価の偏りも課題となっていたが、本システムでは複数の観察者の評価結果を基に AI を構築・更新していくことで、より短時間かつ客観的に評価結果を出力することが可能である。さらに、得られた切羽写真や評価結果を切羽観察簿の形式で出力することができるため、本システムが帳票作成時間の短縮に貢献することも期待される。

なお、本システムの AI は、切羽観察簿の写真と評価区分を教師データとして「教師あり学習」を行う。そして、切羽観察時に写真が入力されると、システム内部で各評価区分に対して確率が算出され、最も確率の高いものが判定結果として出力される（多クラス分類）。

3-2 構成

本システムは、タブレット端末、クラウドサーバー、および複数の PC 端末により構成される（図-2）。

本システムの操作のほとんどは、タブレットにインス

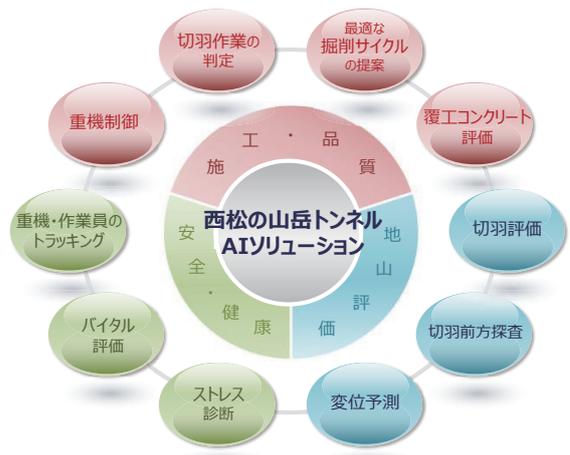


図-1 山岳トンネル AI ソリューションの構想

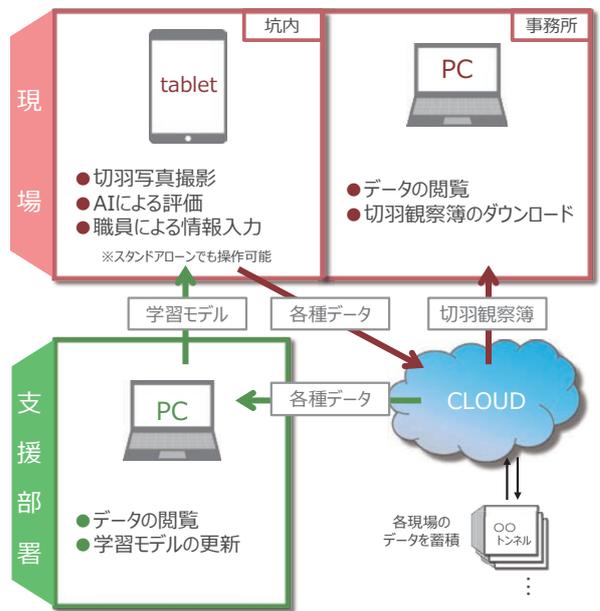


図-2 切羽評価システムの構成

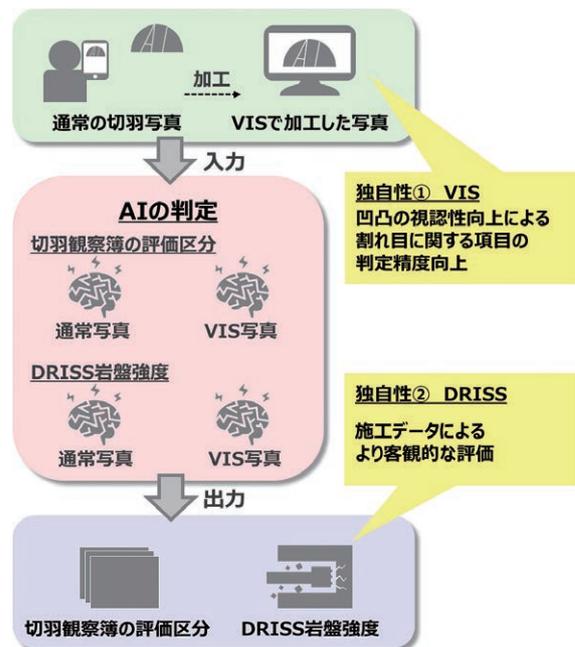


図-3 切羽評価システムの判定概要

表一 DRISS 岩盤強度の評価区分

DRISS岩盤強度 (MPa)		~100	100~50	50~25	25~20	20~10	10~5	5~3	3~	
区分 表示	学習・判定	1	2	3	4	5	6	7	8	
	国交省、JRTT形式	1	2			3		4		
	NEXCO形式	1	2	3	4		5		6	



図一 VIS による切羽写真の加工例

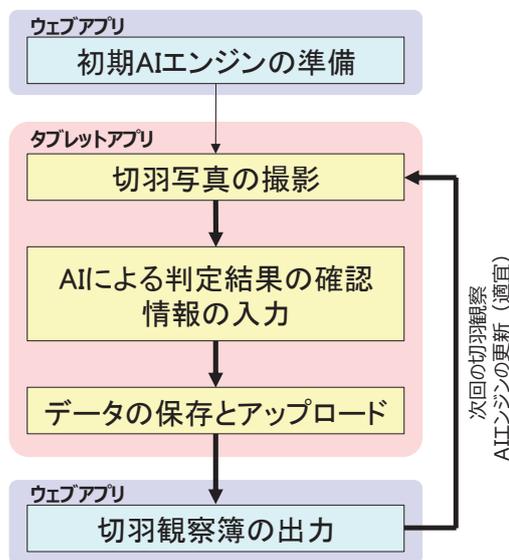
ツールされた専用アプリにて行われる。タブレットで切羽写真を取得すると、切羽性状がAIによって自動評価され、結果がその場で画面に表示される。その際、切羽観察簿に反映させるための職員の評価やコメントを記入することもできる。ネットワーク環境が良くない坑内でもこれらの操作をできるように、AIエンジンをアプリに組み込むことで、スタンドアローンでも動作する仕様としている。また、切羽写真の解像度を高くしてAIの判定精度を確保できるように、カメラの画素数が8メガピクセル程度以上のタブレットを用いることとしている。

アプリで取得された写真や評価結果はクラウドサーバーへ保存され、ウェブアプリを介して閲覧・編集可能である。これにより、現場事務所や本社・支社等の支援部署において切羽性状の情報を共有できる。現場事務所では、写真や評価結果を所定の切羽観察簿の形式でダウンロードすることができる。そのため、現場での他作業の合間に、持ち運び可能なタブレットで観察結果を記入しておくことで、事務所での帳票作成に掛かる時間を短縮することができる。支援部署においては、職員の評価結果を基にAIを学習させ、AIエンジンをアプリに組み込んで配信する。そして、配信の度にタブレット内のアプリやAIエンジンを最新のバージョンに保つことで、継続的な判定精度の向上を図る。

3-3 独自性

本システムの独自性として、「DRISS」による岩盤強度と「VIS」で加工した切羽写真を教師データとしたAIの学習が挙げられる(図一三)。

DRISS²⁾ (Drilling Survey System) は、削岩機による穿



図一五 切羽評価システムの操作手順

孔探査時の油圧や速度の施工データを用いて切羽前方の地山の硬さを定量評価する当社技術である。切羽観察簿の評価項目である圧縮強度は、目視観察やハンマー打撃の結果から判断されるため、主観に影響されてばらつきが生じ易い。そのため、DRISSから得られた岩盤強度(以下、DRISS岩盤強度)も教師データに加え、AIによる判定項目のひとつとすることで、より客観的な評価を可能としている。DRISS岩盤強度は、システム内部において8区分で判定された後、用いる切羽観察簿の形式に合わせて4区分または6区分で表示される(表一)。これは、学習・判定の区分を全現場で統一することで切羽観察簿の形式が異なる現場のデータも教師データとして利用可能とするとともに、切羽観察簿の項目である圧縮強度と同一の区分で表示することで比較を容易にするためである。

VIS³⁾ (Visual illusion based-Image feature enhancement System, 錯視誘発画像特徴強調システム) は、エンボス処理等を応用した画像処理システムであり、錯視誘発処理により画像全体を鮮鋭化(残像錯視)させるとともに、各種画像特徴(凹凸、線構造、エッジ、キメ、粗さ等)を強調(疑似回転錯視)することで、ひび割れ等の細かい特徴の判読性を向上させる。VISで加工して割れ目を強調した切羽写真(以下、VIS写真)をAIへの入力として用いることで、通常の切羽写真(以下、通常写真)に比べ「割れ目の状態」や「割れ目の形態」等の割れ目に関する項目の判定精度の向上が期待される(図一四)。

以上のように、通常写真とVIS写真の2種類を入力データとし、切羽観察簿の各評価区分とDRISS岩盤強度の2種類のデータを出力できるよう、4種類のAIエンジン

を用いて判定を行う。そして、各出力項目ごとにより信頼性の高い AI エンジンの判定を採用することで、システム全体の判定精度の向上が期待される。

3-4 操作手順

本システムの操作手順を以下に示す (図-5)。

(1) 初期 AI エンジンの準備

システム導入初期に用いるための AI エンジンを準備する。掘削が進んだ場合には、その導入現場における職員の評価結果や切羽写真を教師データとして AI エンジンの更新を行うが、掘削初期にはデータ数が十分でない。そのため、システム導入時には過去に掘削した他現場のデータから AI エンジンを構築する。特に掘削初期の判定精度に影響が強く及ぶため、切羽観察簿の形式が同じ現場のデータのうち地山性状が近いものを選定する。現時点では当社施工現場を中心に表-2 のように切羽観察簿データが収集されており、今後初期 AI エンジンを構築する際には、この中からデータを選定する予定である。硬岩と軟岩のデータがほぼ均等に収集されているものの、岩種や観察簿の形式に偏りがあると同時に、過去のデータ取得時には AI の活用を想定していなかったため切羽写真の解像度が低い傾向にある。そのため、今後も継続的に高解像度かつ様々な種類の観察簿データを収集し、より多くの現場に対応できるよう備える予定である。

(2) 切羽写真の撮影

本システムで切羽観察を行う際には、まずタブレットアプリを起動して切羽写真を撮影する (図-6)。切羽観察時にタブレットを操作できない場合には、他のカメラで撮影した写真や過去に撮影した写真等を、タブレットのカメラロールからシステムへ読み込むことも可能である。AI の判定に際し、取得した写真の中から切羽面を手動で抽出する必要があるとともに (図-7)、左肩部、天端、右肩部のように切羽面を分割して切羽観察が行われる場合には、システム内部で写真が自動分割される。

(3) AI による判定結果の確認、情報の入力

写真の撮影後、数秒程度で AI による判定が行われる。全体表示画面 (図-8) では、通常写真と VIS 写真の各々から判定された結果を一覧で確認できる。断面を分割して評価する場合には、分割数分だけ結果が表示される。個別編集画面 (図-9) では、AI の判定結果を項目毎に閲覧できるとともに、切羽観察簿に反映させるための職員の評価結果を入力することができる。基礎情報画面 (図-10) では、観察者名や岩石名等の情報も記入することができる。また、測点や土盛り高さ等の観察前に判明している情報については、ウェブアプリを通して割付表の形式で事前に登録しておくことで、入力の手間を省くことができる。ここまでのタブレットの操作はスタンドアロンでも可能であり、ネットワーク環境の良否に関わらず円滑に行うことができる。

表-2 切羽観察簿データの収集状況

現場 ID	観察簿形式	地質			観察簿枚数
		岩種	硬	軟	
001	国交省	チャート、粘板岩	○		317
002		花崗閃緑岩、デイサイト~流紋岩	○		82
003		花崗閃緑岩	○		225
004		凝灰岩、流紋岩	○	○	219
005		砂岩、泥岩	○	○	77
006		礫岩、凝灰岩		○	277
007		風化真岩、風化ドレライト		○	81
008	NEXCO	花崗岩	○		369
009		安山岩、花崗岩	○		342
010		粘板岩、花崗岩	○		102
011		安山岩、流紋岩、凝灰岩	○	○	657
012		千枚岩		○	202
013	JR TT	凝灰岩		○	245
014		砂岩、泥岩、礫岩		○	480



図-6 切羽写真の撮影の様子



図-7 切羽面の抽出 (枠の位置や大きさを操作)

(4) データの保存とアップロード

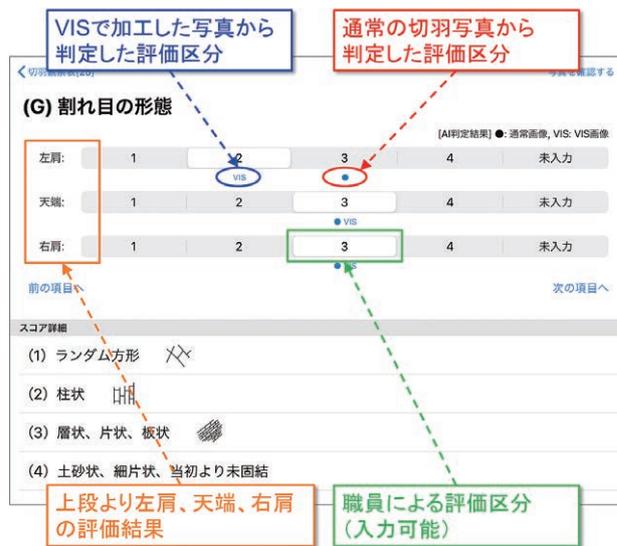
AI の判定結果や職員の入力データはアプリ内に保存され、ネットワーク環境下において手動でクラウドサーバーへアップロードすることができる。アップロードされたデータは、「3-2 システム構成」で述べたように情報の管理・共有、教師データ作成、帳票作成等の目的で利用される。

(5) 切羽観察簿の出力

クラウドサーバーにアップロードされたデータは、ウェブアプリを介して閲覧・編集することができる (図-11)。タブレットで入力した情報を PC で追記・編集でき



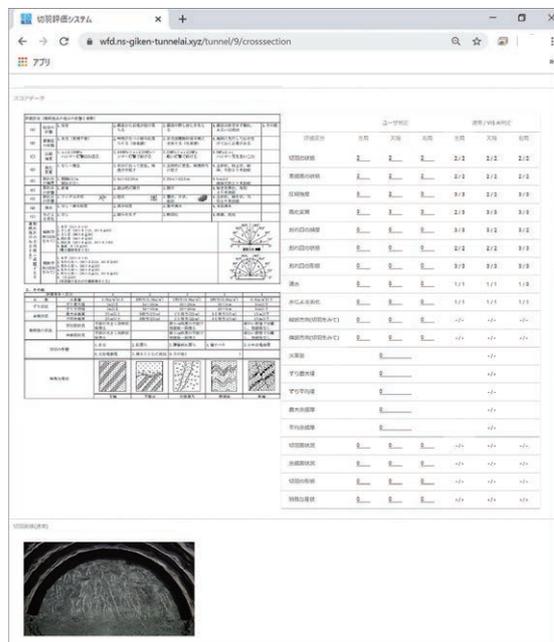
図一八 全体表示画面



図一九 個別編集画面



図一十 基礎情報画面



図一十一 ウェブアプリ画面

るとともに、切羽観察簿形式でダウンロードすることができる。さらに、今後は、他社のシステムで切羽観察簿を作成・管理することができるよう、記入した情報を他システムの形式で出力する機能を実装する予定である。

§ 4. AI エンジンの検証

4-1 方法

DRISS を実施した現場 (表一2 中の ID : 006) を対象に、AI エンジンの判定精度を検証した。

今回の検証では、全体のデータの数を考慮して、交差検証を採用した (図一12)。この方法では、全体のデータを学習用の訓練データと評価用の検証データにランダムに分割し、訓練データから AI エンジンを構築して検証データを判定する。分割の組合せを変えながら AI エンジンの構築と判定を複数回行うことで、判定精度を評価する。これは、特にデータ数が少ない場合に有効な方法である。

判定精度を定量的に表すために、指標値として正解率を採用した。正解率は全ての AI の判定のうち職員の評価と同じであったものの割合を示しており、この値が大きいくほど判定精度も良いといえる。

また、職員の評価や DRISS で得られた正解データの分布の偏りも考慮することとした。万が一 AI が写真の内容に関わらず最頻値を答えてしまう場合には、AI の学習が不十分であっても正解率が高くなることがある。そのため、判定精度を評価する際には、最頻値が全体のデータ数を占める割合 (ベースライン) と正解率の大小関係についても考慮する必要があると考えられる。ベースラインは評価項目毎に算出される値であり、例えば評価区分が 1, 2, 3, 4 であるデータの数が各々 0, 37, 93, 34 の場合には、最も頻度の高い評価区分 3 のデータ数 93 を全体のデータ数 164 で除した値 56.7% となる。

4-2 結果と考察

得られた正解率とベースラインを表-3 に示す。また、検証の結果と考察を以下に示す。

(1) 正解率とベースラインの傾向

正解率は50~90%程度の範囲に分布しており、項目によって値が大きく異なる。ほとんどの項目において正解率とベースラインがほぼ同値を示していることから、正解率は正解データの分布に強く影響されていると考えられる。そのため、今後は、各評価区分が偏りなく分布するように教師データを収集して検証を行うべきであると考えられる。一方、項目Bでは正解率がベースラインよりも9%程度大きく、判定精度が比較的良好といえる。

(2) DRISS 岩盤強度の判定精度

DRISS 岩盤強度では正解率がベースラインよりも10%程度小さく、判定精度が良くないといえる。その要因のひとつとして、探査孔の崩壊等によって穿孔が困難になった際に DRISS 岩盤強度が実際よりも高く算出されてしまう場合があり、ばらつきが生じ得ることが挙げられる。これに関しては、穿孔効率を考慮できるように削岩機の油圧データ等も教師データに加えることで、改善される可能性があると考えられる。

また、DRISS 岩盤強度が本システムでは切羽全体の写真から判定されるのに対し、穿孔時には探査孔周辺の局所的な範囲で計測されることも一因として挙げられる。このような評価範囲の違いに関しては、当社開発技術の DRISS-3D⁴⁾ を活用し、探査孔に加えて発破孔やロックボルト孔等の施工データも考慮して、より広い範囲で岩盤強度を計測することによって軽減できると考えられる。本来、切羽観察簿の評価項目の圧縮強度と DRISS 岩盤強度は独立的に評価されているとともに、先述のように各々ばらつきが生じ得るものであるため、結果が異なる場合も少なくない。両者を連携させて目視や施工のデータを総合的に評価することによっても、判定精度の向上を図ることが可能であると考えられる。

多クラス分類における各評価区分の確率を調べると、僅差で不正解の評価結果が出力されている場合も見られ、上記の要因を解消することで正解率の向上が期待される。

(3) VIS の効果

いずれの項目においても、通常写真と VIS 写真の正解率はほぼ同値を示している。写真内の割れ目の判読性を向上させることを目的に VIS を適用したが、対象現場には主に軟岩が分布しており、割れ目の影響や分布が少なかったため、通常写真との間に大きな差異が生じなかったと考えられる。今後は、割れ目の発達しやすい硬岩を対象に同様の検証を行い、VIS の効果を確認する必要があると考えられる。

§5. まとめ

今回、AI で切羽性状を自動評価するためのシステムと



図-12 交差検証の概念図

表-3 正解率とベースライン

	正解率(%)		ベースライン (%)
	通常写真	VIS写真	
項目A(切羽の状態)	82.4	83.0	82.1
項目B(素掘面の状態)	73.2	73.4	64.1
項目C(圧縮強度)	74.9	74.9	73.1
項目D(風化変質)	61.1	60.1	54.1
項目E(割れ目の頻度)	69.7	68.5	71.7
項目F(割れ目の状態)	56.6	56.5	58.8
項目G(割れ目の形態)	77.5	77.5	77.4
項目H(湧水)	89.6	89.6	89.6
項目I(水による劣化)	93.0	93.1	93.1
DRISS岩盤強度	46.3	48.2	56.7

して『切羽評価システム』を開発した。本システムは、AI 活用技術によって山岳トンネルの省人化・自動化を目指す『山岳トンネル AI ソリューション』の要素技術である。

AI エンジンの検証の結果、判定精度の良否には項目毎にばらつきが認められた。DRISS 時の穿孔効率の考慮、教師データの収集、分布の偏りが少ないデータでの検証、硬岩に対する VIS の効果の検証等により、判定精度の向上を図ることができると考えられる。

今後は、判定精度向上に関する取組みを継続するとともに、本システムを実現場へ展開していく予定である。

謝辞。本システムの開発にあたり、(株) sMedio、東京理科大学の小島尚人教授には大変お世話になりました。感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 浅川伸一、江間有沙、工藤郁子、巢籠悠輔、瀬谷啓介、松井孝之、松尾豊：ディープラーニング G 検定公式テキスト、翔泳社、2018。
- 2) 山下雅之、石山宏二、木村哲、福井勝則、大久保誠介：長尺さく孔データと岩盤強度の関係に関する検討、土木学会第 61 回年次学術講演会、Ⅲ-333, pp. 661-662, 2006。
- 3) 学校法人東京理科大学：コンクリート表面ひび割れ点検支援を目的とした錯視誘発画像特徴強調・判読支援システム、特許第 4868509 号、特許第 5046119 号、特許第 5246770 号、特許第 5769295 号、特許第 6021053 号。
- 4) 山下雅之、三井善孝、塚田純一：ドリルジャンボの削孔データを使用した 3 次元地山評価システムの開発、土木学会第 72 回年次学術講演会、VI-208, pp. 415-416, 2017。