

山岳トンネル向け切羽観察・評価システムの開発

村岡 亜美^{*1}・野田 奈央人^{*2}・小山 俊滉^{*3}・中原 法久^{*4}・須志田 藤雄^{*5}

概 要

切羽観察・評価の省人化・省力化・技術の伝承を目的として、AI を用いて写真から切羽観察の各評価項目を出力し、支保パターンを判定する「切羽 AI アプリ」の開発を進めている。また、AI による画像解析を導入するためには、色調や撮影条件が統一された画像撮影が必要である。これらの条件の中で、筆者らは切羽照明に着目し、適切な照明の個数とその配置方法について検討した。

本稿では、AI 学習に用いる切羽写真に適した切羽照明に関する検討の結果と切羽 AI アプリ開発の進捗を報告する。

キーワード：山岳トンネル，AI，支保パターン，切羽観察，照明，省力化

DEVELOPMENT OF A TUNNEL FACE OBSERVATION AND EVALUATION SYSTEM FOR MOUNTAIN TUNNELS

Ami MURAOKA^{*1}, Naoto NODA^{*2}, Toshihiro KOYAMA^{*3}, Norihisa NAKAHARA^{*4}, Fujio SUSHIDA^{*5}

Abstract

A tunnel face AI application is being developed that will use artificial intelligence (AI) to extract evaluation items for tunnel face observation from photographs and determine support patterns. The aim is to save manpower and labor and ensure the inheritance of technologies for tunnel face observation and evaluation. Also, in order to introduce AI-based image analysis, it is necessary to ensure that the images are taken under uniform conditions and with the same color tones. Among these conditions, the authors focused on the lighting of the tunnel face and examined the appropriate number of lighting fixtures and their arrangement method.

This paper presents the results of a study of tunnel face lighting suitable for tunnel face photographs that will be used for AI learning, and reports on the progress in the development of a tunnel face AI application.

Keywords: Mountain tunnel, AI, Support patterns, Tunnel face observation, Lighting, Labor saving

*1 Tunnel Geology Group, Tunnel Technology Department, Civil Engineering Division

*2 Nagoya Branch, Gomoyama Tunnel Office

*3 Sapporo Branch, Uchiura Tunnel Office

*4 Manager, Tunnel Geology Group, Tunnel Technology Department, Civil Engineering Division

*5 General Manager, Tunnel Technology Department, Civil Engineering Division

山岳トンネル向け切羽観察・評価システムの開発

村岡 亜美*1・野田 奈央人*2・小山 俊滉*3・中原 法久*4・須志田 藤雄*5

1. はじめに

山岳トンネル工事における切羽観察は、切羽の安定性や危険度を直接目視で確認する重要な作業であるが、熟練技術者は不足しており、知識や経験の違いから切羽観察・評価に個人差が生じることがある。また、高齢化による熟練技術者の大量離職に伴う技術者不足は今後も喫緊の課題であり、省人化や省力化、技術の伝承が急務である。

筆者らは、これらの問題を解消するため、切羽写真から切羽観察の各評価項目を出力し、支保パターンを判定する「切羽 AI アプリ」の開発を進めている。また、AI による画像解析を導入するためには、色調や撮影条件が統一された画像撮影が必要であることから、切羽照明に着目し、適切な照明器具の個数とその配置方法について検討した。

本稿では AI 学習に用いる切羽写真に適した切羽照明に関する検討の結果と切羽 AI アプリ開発の進捗について報告する。

2. 切羽写真用切羽照明の検討

2.1 検討内容

本検討では、切羽撮影に用いるカメラは扱いやすさを重視して iPhone12 ProMax を使用した。切羽写真用の照明器具は、バッテリータイプの軽量型高輝度 LED ランプ (JCT-50(50W モジュール)×2 個) を最大 2 台使用した。

切羽写真用切羽照明を写真-1 に、切羽写真の撮影状況を写真-2 に示す。なお、常設の照明は

天端の中央より 1.5m 右側の切羽後方 35m のところに設置されていた。

切羽の撮影は、カメラを中央部に設置し、次の①～④に示す 4 通りの照明配置パターンにおいて、点灯・消灯の組み合わせを変えて行い、写真撮影の状況を確認した。

- ① 照明器具 2 台を中央部から左右にそれぞれ 1.5m 離して外向き 10° で設置



写真-1 切羽写真用切羽照明



写真-2 切羽写真の撮影状況

*1 土木本部 トンネル技術部 トンネル地質グループ

*2 名古屋支店 御望山トンネル作業所

*3 札幌支店 内浦トンネル作業所

*4 土木本部 トンネル技術部 トンネル地質グループ グループリーダー

*5 土木本部 トンネル技術部 部長

- ② ①と同じ照明位置で内向き 20° で設置
- ③ 照明器具 2 台を中央部で近接させて外向き 45° に設置
- ④ 照明器具 1 台を中央部に設置

また、切羽の撮影時に照度の測定を行った。照度は、照度計（セコニック i-346）を用いて、下半の中央と左右の 3 か所で測定し、測定値にバラツキがあるため 5 回計測した値の平均値とした。

2.2 検討結果

検討結果として、照明器具の配置や点灯の条件毎に照度の測定結果と写真撮影の状況を○△×で整理して表-1に示す。

写真撮影の状況は、AI による画像解析に用いることを想定し、良好 (○)、可 (△)、不良 (×) で評価した。亀裂等の明瞭さは切羽全体が良く見え亀裂による影が濃いものを良好 (○)、影が薄いものを可 (△)、切羽全体が見えづらいものを不良 (×) とした。機動性は照明器具の設置にかかる手間と時間で評価し、設置台数が 1 台の場合は良好 (○)、2 台の場合は可 (△) とした。表にて青色網掛けを施した条件は、写真撮影の 4 つの評価項目で○が 3 つ以上となったものを総合評価が良好 (○) であったと評価して示した。

無灯火時の条件 No.4 より、常設の照明が若干右側に寄っているため、全体的に左側よりも右側が明るくなっている。この明るさの偏りを補正すると考えられる左側点灯時の条件である No.3, 9,

13 は、いずれも総合評価が可 (△) であった。総合評価が良好 (○) であった条件である No.2, 5, 6, 11, 12 は、いずれも左端と右端の照度差が 100Lx 以内であり、かつ中央部の照度が 350Lx 以上で左右よりも突出した値であるものが多い。

以上の結果より、亀裂による影が薄いものの切羽全体が良く見え、唯一撮影者の照明設置による負担の少なくなる条件 No.6 が、AI 学習用写真を継続して撮影するうえで最も優れた条件であると考え。この結果を踏まえて、切羽写真の撮影方法を条件 No.6 に統一して複数の現場で撮影を行い、それらの切羽写真を用いて切羽 AI アプリの開発を進めた。

3. 切羽AIアプリ概要

切羽AIアプリは、AIを用いて写真から切羽観察の各評価項目を出力し、支保パターンを判定するアプリである。

切羽AIアプリの各処理の流れを図-1に示す。開発中の切羽AIアプリには、岩石名を判定する岩石AI、切羽評価区分を判定する切羽写真AI、支保パターンを判定する支保パターンAIの3つのAIを組み込んでいる。これらのうち、本稿では切羽写真AIと支保パターンAIについて述べる。

(1) 切羽写真AI

切羽写真AIは、切羽写真と切羽サーモグラフィ画像を撮影または選択し、切羽面の範囲を指定す

表-1 検討条件・検討結果一覧

条件 No.	照明位置 ■:点灯 □:消灯	傾き	照度 (Lx:ルクス)			写真撮影評価結果				
			左端	中央	右端	露出の均等性	支保工周辺の明るさ	亀裂等の明瞭さ	機動性 (※)	総合評価
1		外側10°	182	312	392	×	×	△	△	×
2		外側10°	426	488	412	○	○	○	△	○
3		外側10°	407	438	256	△	×	○	△	△
4		外側10°	169	281	248	△	×	△	△	△
5		内側20°	315	609	406	○	○	○	△	○
6		中央0°	225	568	262	○	○	△	○	○
7		外側45°	349	323	424	×	×	△	△	×
8		外側45°	263	298	339	△	△	△	△	△
9		外側45°	257	298	245	○	×	△	△	△
10		外側45°	178	297	337	×	×	×	△	×
11		外側10°	267	365	329	○	○	○	△	○
12		外側10°	272	348	331	○	○	○	△	○
13		外側10°	276	327	255	△	×	△	△	△
14		外側10°	186	302	337	×	×	×	△	×

※機動性は、照明個所数が、1箇所を○、2箇所を△とした。

ること(図-2)、自動的に左肩部、天端部、右肩部のそれぞれで切羽評価項目が判定される。

図-3(a)はAI判定を行った一例である。★印が表示されたものはAI判定されたものであり、黄色で塗られた箇所は切羽観察者が手入力したものである。AI判定に対して異なる判定結果を入力したい場合に、手入力にて変更ができる仕様となっている。そして左肩部、天端部、右肩部の3つのAI判定を統合した結果を出力することができ、その統合した結果をもとに切羽観察日報を作成することも可能である。

(2) 支保パターンAI

支保パターンAIは、各切羽評価項目を入力することで支保パターンを判定する。判定結果は、図-3(b)に示すように支保パターン毎に確率分布の円グラフで表示されるとともに、確率の最も高いものがAIによる判定結果として表示される。

切羽AIアプリで判定した結果はクラウド内に保存され、切羽AIアプリをインストールし、アカウント登録している者であれば誰でも確認することができる。本社の地質技術者と現場技術者が情報共有を行うことにより、経験の浅い現場技術者へ切羽観察・評価に関する指導を通じて、更なる技術力の向上を図ることができる。

4. AI学習方法

4.1 切羽写真AI

切羽写真AIには学習データとして、山岳トンネルの切羽で取得した切羽写真とサーモグラフィ画像データ、切羽観察日報の各評価項目をそれぞれ1101か所分入力した。切羽写真AIに入力した評価項目毎のデータ数を表-2に示す。評価区分は本来1~4の4段階評価であるが、1と2など2つの評価が選ばれた学習データが多く、今回の学習では1.5、2.5、3.5の段階を追加し、2つの評価が選ばれたデータはその平均値をとることとした。

4.2 支保パターンAI

支保パターンAIの学習は、切羽観察日報の各評価項目と支保パターンをそれぞれ1890か所分入力した。支保パターンAIに入力した評価項目毎の

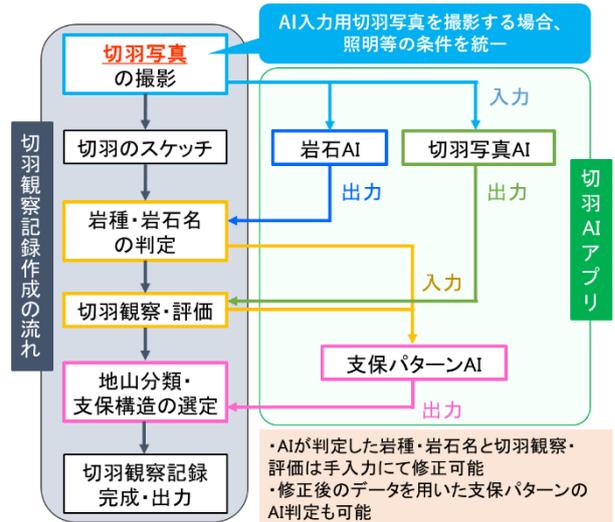


図-1 切羽 AI アプリの各処理の流れ



図-2 切羽写真とサーモグラフィ画像



(a) 切羽評価項目 (b) 支保パターン

図-3 AI判定の一例(アプリ画面)

表-2 切羽写真 AI 学習個数

データ数: 1101	評価区分						
	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
	良好 ← 地山状況 → 不良						
A 切羽の状態	117	576	400	0	6	0	2
B 素掘面の状態	3	15	1013	41	26	0	3
C 圧縮強度	28	18	152	276	470	138	19
D 風化変質	154	142	349	78	233	125	20
E 破砕部の切羽に占める割合	252	3	519	21	306	0	0
F 割れ目の頻度	69	77	295	120	455	57	28
G 割れ目の状態	79	83	521	159	106	70	83
H 割れ目の形態	421	22	89	58	362	117	32
I 湧水(目視での量)	681	0	188	2	69	11	150
J 水による劣化	379	32	430	154	103	0	3

データ数を表-3に、支保パターン毎の学習データ比率を表-4に示す。切羽写真AI同様、評価区分の数値には1.5, 2.5, 3.5の中間値を設けている。

4.3 切羽観察日報の各評価項目データ

学習に際しては切羽写真AIと支保パターンAIのどちらも切羽観察日報の評価項目のデータを地質技術者により、左肩部、天端部、右肩部の3つに区分し再度判定したデータを学習させた。

5. 検証

5.1 検証内容

切羽AIアプリの判定精度を確認するために、施工中のトンネル現場のデータを用いて検証を行った。

(1) 切羽写真AI

検証では、切羽AIアプリに切羽写真とサーモグラフィ画像を入力し、判定された切羽評価項目と支保パターン確率分布の結果を、実際の切羽観察日報の判定結果と比較した。

今回、切羽観察者の見方による個人差のばらつきを考慮し、切羽写真AIの評価項目毎評価区分の判定結果において、評価区分が観察者と等しく判定されたものを判定誤差±0、評価区分が0.5異なると判定されたものを判定誤差±0.5とした。判定に使用したデータ数は212か所分である。

(2) 支保パターンAI

検証では、実際の切羽観察日報の各評価項目結果を支保パターンAIに入力し、AI判定により得られた結果と実際に施工された支保パターンを正答として比較して正解率等をまとめた。支保パターンの判定結果では、AI判定結果の出現する確率が1番高い支保パターンを第1候補、2番目に高いものを第2候補とした。判定に使用したデータ数は446か所分である。

5.2 検証結果

(1) 切羽写真AI

切羽写真AIの判定結果を表-5に示す。判定誤差±0の正解率を見ると、正解率70%以上を示す切羽評価項目はE（破砕部の切羽に占める割合）のみであった。判定誤差±0.5ではA（切羽の状態）、

B（素掘削の状態）、C（圧縮強度）、E（破砕部の切羽に占める割合）、F（割れ目の頻度）の5項目において正解率70%以上を示した。一方、H（割れ目の形態）では判定誤差±0で3%、±0.5で12%と他の項目に比べ低い正解率を示した。

この結果より、立体的な情報であるH（割れ目の形態）と2次元的な情報である写真を結び付けることは難しいと考えられる。

今後は判定誤差±0の正解率を上げていくとともに、立体的な情報であるH（割れ目の形態）等の正解率を上げる方法を検討する。

(2) 支保パターンAI

支保パターンAIの判定結果（第1候補、第2候補）の正答率等をまとめて表-6、表-7に示す。なお第2候補の表は、第1候補と正解が一致しなかったデータのみで検証を行ったものである。

表-3 支保パターン AI 評価項目別学習個数

画像枚数：1890		評価区分						
		1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
		良好 ←			地山状況			
評価項目	A 切羽の状態	324	460	858	23	108	81	36
	B 素掘削の状態	30	117	1306	82	42	31	282
	C 圧縮強度	7	21	847	403	245	131	236
	D 風化変質	70	272	649	298	243	110	248
	E 破砕部の切羽に占める割合	417	30	691	39	405	6	302
	F 割れ目の頻度	12	22	215	528	756	91	265
	G 割れ目の状態	26	429	376	437	208	130	284
	H 割れ目の形態	373	42	178	479	476	63	279
	I 湧水（目視での量）	1015	117	432	208	117	1	0
	J 水による劣化	1080	132	372	121	182	3	0

表-4 支保パターン毎の学習データ比率

	支保パターン							合計
	III N	II N	I N-2	I N-1	I L	I S	特L	
データ数	18	207	778	546	181	58	102	1890
比率	1%	11%	41%	29%	10%	3%	5%	100%

表-5 切羽写真 AI 判定結果

切羽評価項目	正解率 (判定誤差±0)	正解率 (判定誤差±0.5)
A 切羽の状態	36%	98%
B 素掘削の状態	67%	93%
C 圧縮強度	39%	87%
D 風化変質	23%	41%
E 破砕部の切羽に占める割合	87%	96%
F 割れ目の頻度	34%	75%
G 割れ目の状態	30%	61%
H 割れ目の形態	3%	12%
I 湧水（目視での量）	54%	65%
J 水による劣化	33%	68%

■ : 正解率70%以上 ■ : 正解率20%以下

正解率をみると、第1候補では69%、第2候補では49%であり、第1候補または第2候補が実際の支保パターンと一致した割合（正解率）は84%となった。

各正解合計のうちAIが正しく判定できた数の割合を示し、AIの判定精度の指標となる再現率に着目すると、表-4の学習データ数の比率が高い支保パターンにおいて、再現率が高くなる傾向がある。そのため、各支保パターンの再現率を向上させ、かつ正解率を向上させるためには、支保パターン毎の学習データ数の偏りを低減させる必要があると考える。

また、今回の検証では実際の現場データを使用したことで正解となる支保パターンに偏りが生じ、ⅢNやIL、特Lの支保パターンにおいて再現率等の確認ができなかった。

今後は過去の切羽観察日報を用いて今回再現率等を確認できなかった支保パターンにて判定を行い、また学習データの偏りを低減させ、再現率及び正解率を向上させる方法を検討する。

6. まとめ

筆者らは切羽観察・評価の省人化・省力化・技術の伝承を目的として、写真から切羽観察の各評価項目を出力し、支保パターンを判定する「切羽AIアプリ」の開発を進めている。

AI学習に用いる切羽写真に適した切羽照明に関する検討では、適切な照明器具の個数とその配置方法について検討を行った。その結果、中央に切羽写真用切羽照明1台を設置する方法が適切であると判断した。

切羽AIアプリには切羽評価項目を判定する切羽写真AIと支保パターンを判定する支保パターンAIが組み込まれており、実際の現場の判定結果とAIによる判定結果を比較した。

切羽写真AIによる切羽評価項目別の判定結果は、判定誤差±0.5では多くの項目が正解率70%以上を示したが、H（割れ目の形態）は12%と低い値を示した。このことから、立体的な情報であるH（割れ目の形態）の判定を2次元的な情報である

表-6 支保パターンAI判定結果（第1候補）

	AI判定結果(第1候補)								正解合計	再現率	判定数合計	正解率
	ⅢN	ⅡN	IN-2	IN-1	IL	IS	特L					
正解	ⅢN	0	0	0	0	0	0	0	0	0%	446	69%
	ⅡN	0	33	14	4	0	0	0	51	65%		
	IN-2	0	2	47	7	0	0	0	56	84%		
	IN-1	0	0	57	223	0	1	0	281	79%		
	IL	0	0	0	0	0	0	0	0	0%		
	IS	0	0	27	27	0	4	0	58	7%		
	特L	0	0	0	0	0	0	0	0	0%		
判定結果合計	0	35	145	261	0	5	0					
適合率	0%	94%	32%	85%	0%	80%	0%					

表-7 支保パターンAI判定結果（第2候補）

	AI判定結果(第2候補)								正解合計	再現率	判定数合計	正解率	正解率(第1&第2)
	ⅢN	ⅡN	IN-2	IN-1	IL	IS	特L						
正解	ⅢN	0	0	0	0	0	0	0	0	0%	139	49%	84%
	ⅡN	0	5	2	11	0	0	0	18	28%			
	IN-2	0	0	2	1	0	6	0	9	22%			
	IN-1	0	13	0	41	0	4	0	58	71%			
	IL	0	0	0	0	0	0	0	0	0%			
	IS	0	1	18	15	0	20	0	54	37%			
	特L	0	0	0	0	0	0	0	0	0%			
判定結果合計	0	19	22	68	0	30	0						
適合率	0%	26%	9%	60%	0%	67%	0%						

写真だけで判断することは難しいと考えられる。

また、支保パターンAIの判定結果を見ると、第1候補または第2候補が正解と一致した割合は84%と高い値を示した。

今後は最新の現場データだけでなく過去のデータも活用して判定精度の検証を継続するとともに、切羽写真AIと支保パターンAIの判定精度が向上するようAIの学習方法を検討していく。

参考文献

- 1) 村岡亜美, 小山俊滉, 中原法久, 舟橋孝仁, 須志田藤雄, 岸田展明, 石田滋樹: 支保パターン判定 AI システムの開発と切羽撮影に適した照明の検討, 土木学会第 78 回年次学術講演会, VI-272, 土木学会, 2023.9
- 2) 野田奈央人, 村岡亜美, 小山俊滉, 中原法久, 舟橋孝仁, 須志田藤雄, 岸田展明, 石田滋樹: 切羽観察AIアプリの開発とその評価の検証, 土木学会第79回年次学術講演会, VI-1004, 土木学会, 2024.9
- 3) 野田奈央人, 村岡亜美, 小山俊滉, 中原法久, 舟橋孝仁, 須志田藤雄: 3次元亀裂解析システムと切羽観察AIアプリの開発, 第34回トンネル工学研究発表会講演集, 報告I-10, 土木学会トンネル工学委員会, 2024.11