

**AIを活用したトンネル切羽の地質評価と肌落ち予測支援
による災害防止に関する研究開発**

一般財団法人 先端建設技術センター 審議役

吉川 正

研究開発実施項目

- (1)AIを活用した切羽地質評価の支援システム
- (2)AIを活用した肌落ち予測の支援システム
- (3)肌落ち災害及び防止システムの実態調査

研究開発実施体制

- (一財)先端建設技術センター (株)安藤・間、鹿島建設(株)、清水建設(株)、戸田建設(株)
(平成30年度～令和4年度) 東洋大学(令和元年度～令和3年度)
基礎地盤コンサルタンツ(株)、(株)想画、日本システムウェア(株)(令和2年度～令和4年度)

研究別の研究期間と研究内容

- (1) (一財)先端建設技術センター 自主研究及び共同研究(平成30年6月～現在)
(開発方針策定、PC用ソフトウェア、iPhone用アプリケーション、ICTツールの活用検討等)
- (2)国土交通省 建設技術研究開発助成制度 採択研究(令和元年8月～令和2年3月)
(現地調査、ICTツールの活用によるデータ取得・評価・分析等)

1. はじめに

「開発の経緯」

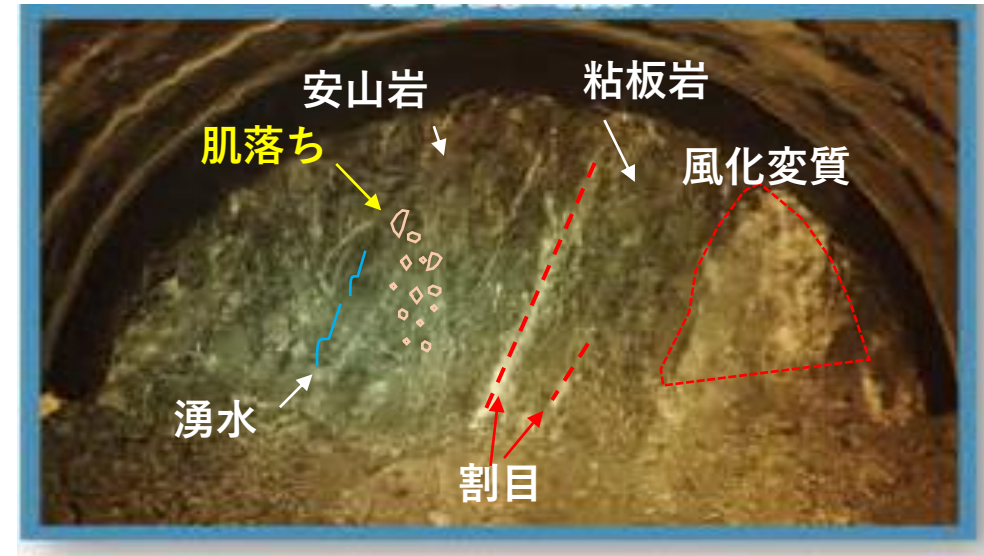
平成30年度よりセンター内で開始した「建設分野でのAI利用に関する調査研究」の一環として、山岳トンネル分野の熟練工減少への対応、安全性並びに生産性の向上に着目して研究開発を開始した。AIの技術動向について講習会や講演会への参加、有識者へのヒアリングなどの現状調査、研究開発実施項目の設定、研究協力者の参画を得て、研究開発を進めてきた。

トンネル切羽

「現状の調査・分析」

トンネル切羽の地質評価や肌落ち発生の兆候と防止の判断について

- ▣ 熟練者や経験豊富な専門技術者による切羽の目視観察や切羽状況の把握など、多くが彼らの経験や勘に頼ってきた。



岩種・割目の頻度・状態・形態・風化変質・湧水・圧縮強度

AIを活用した切羽評価・肌落ち予測支援

「本研究開発の目的」

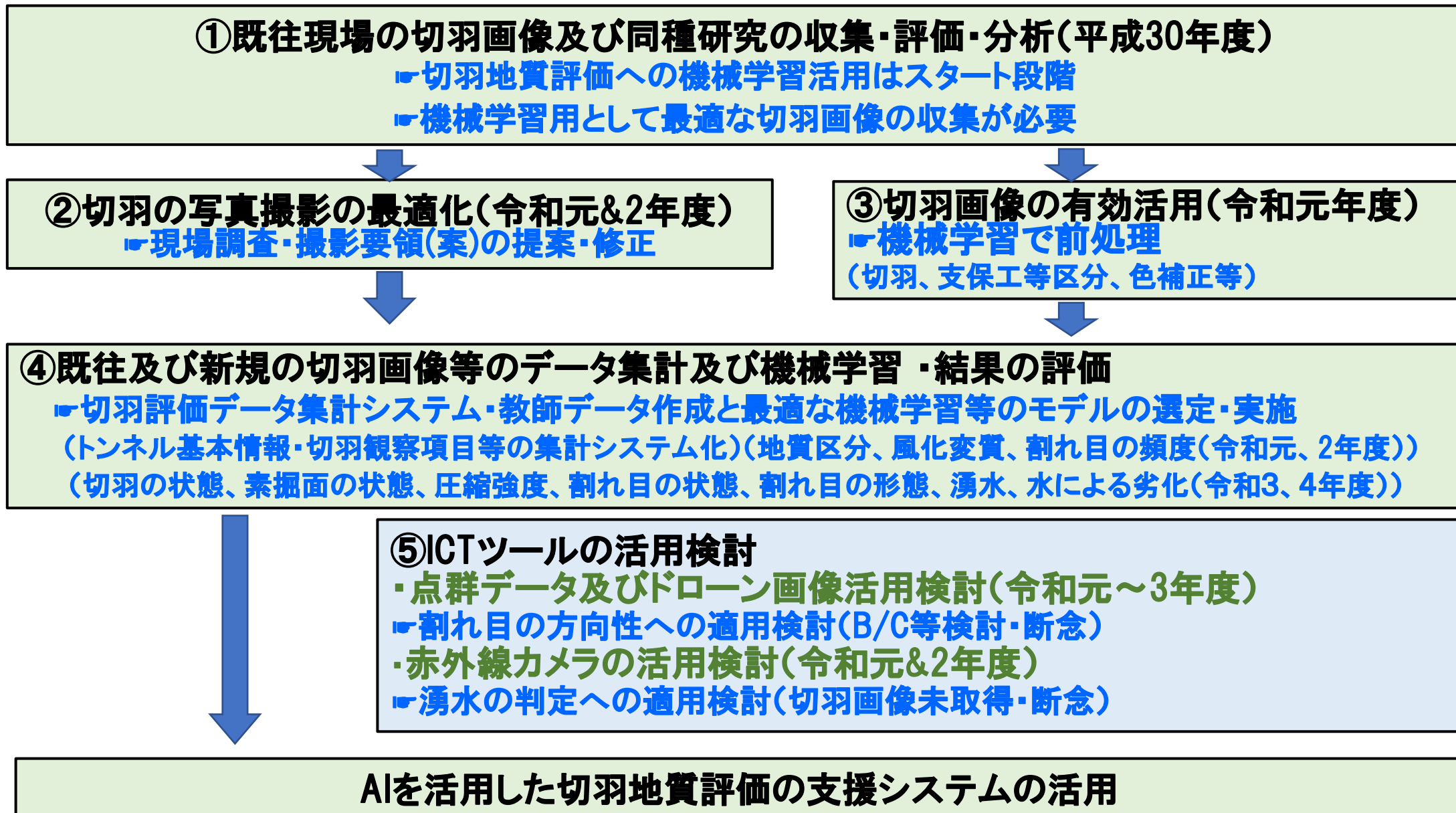
画像、掘削機器等のデータについて、

- ICTの活用による迅速な取得
- 伝送・処理、仕様の共通化による有効活用、機械学習(ニューラルネットワーク等)による迅速な現象の把握と評価

- ▣ 未熟練者によるトンネル切羽の地質評価、肌落ち予測、最適な肌落ち防止対策の計画・実施の支援 2

2. 研究開発項目と成果の概要

(1) AIを活用した切羽地質評価の支援システム研究開発実施フロー

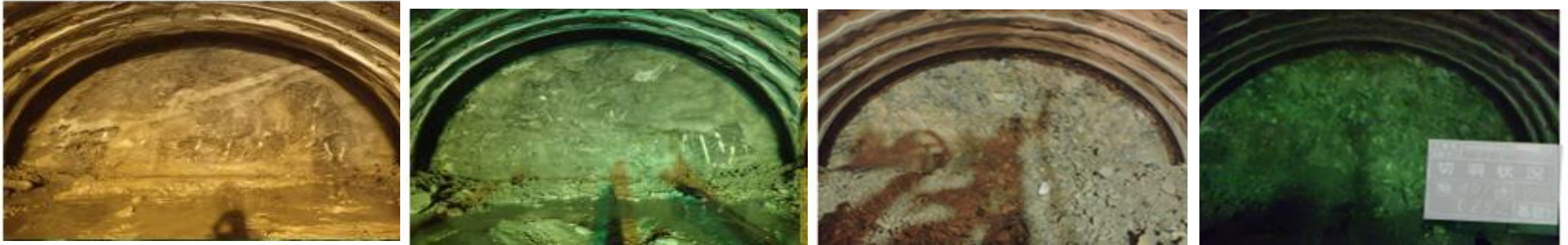


(1) AIを活用した切羽地質評価の支援システム

① 既往現場の切羽画像及び同種研究の収集・評価・分析

a. 既往施工現場の切羽画像の収集・評価(4地方整備局9現場)

✦ 機械学習用の画像としては、不適切なものがある(ピンボケ、色調、切羽欠け、小画素数、黒板・影入り等)。



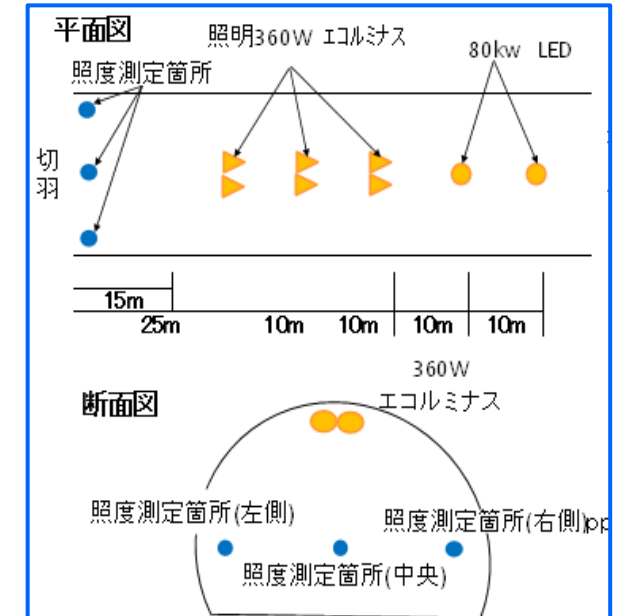
不適切な既往現場の切羽画像の例

b. 現場における切羽画像の撮影状況の調査・評価結果

- ✦ 天井照明、補助照明、重機類の照明等照明施設が各現場で異なる。
- ✦ 照度は70~200Lxとばらついている。

(安藤間、鹿島建設、清水建設、戸田建設の各現場の協力)

👉 AI活用のための山岳トンネル切羽の撮影要領が必要と判断、提案



切羽の撮影条件の調査例

②切羽の写真撮影の最適化

▣現場調査

▣AI活用のための山岳トンネル切羽の撮影要領(案)の提案・修正

👉令和元年度に切羽写真撮影要領(案)を提案し、令和2年度に現場撮影を実施して、画素数、撮影モード、焦点、三脚の有無、色見本の位置等を検証、修正案を再提案した。

「撮影準備」

- ①画素数は1200万以上で撮影する。
- ②撮影モードはAUTOに設定する。
- ③データ形式はJPEGとする。
- ④色見本は白黒とし、切羽から10m程度離れた位置に設置する。
・色見本の設置は岩盤判定会議及び発注者立会い時とする。
- ⑤撮影時の照度が不十分で手振れが生じる場合、三脚使用で手振れを防ぐ。

「撮影時の留意点」

- ①切羽全体がおさまるように切羽から離れ、トンネル中心部から正面画像を1枚、左右に1mで正面画像を各1枚、計3枚の切羽全体の画像を撮影する。
👉3D画像生成ソフトMetashape(ロシア製)の適用・B/C検討の結果正面1枚に変更する。
- ②ズームは原則使用しない。
- ③投光器等により切羽を照らす。撮影時の照度は、70~150Lxとする。
- ④フラッシュは使用しない。
- ⑤切羽面に焦点を合わせる。
- ⑥画像の切羽部分に黒板や人工物の影が入らないようにする。

③切羽画像の有効活用

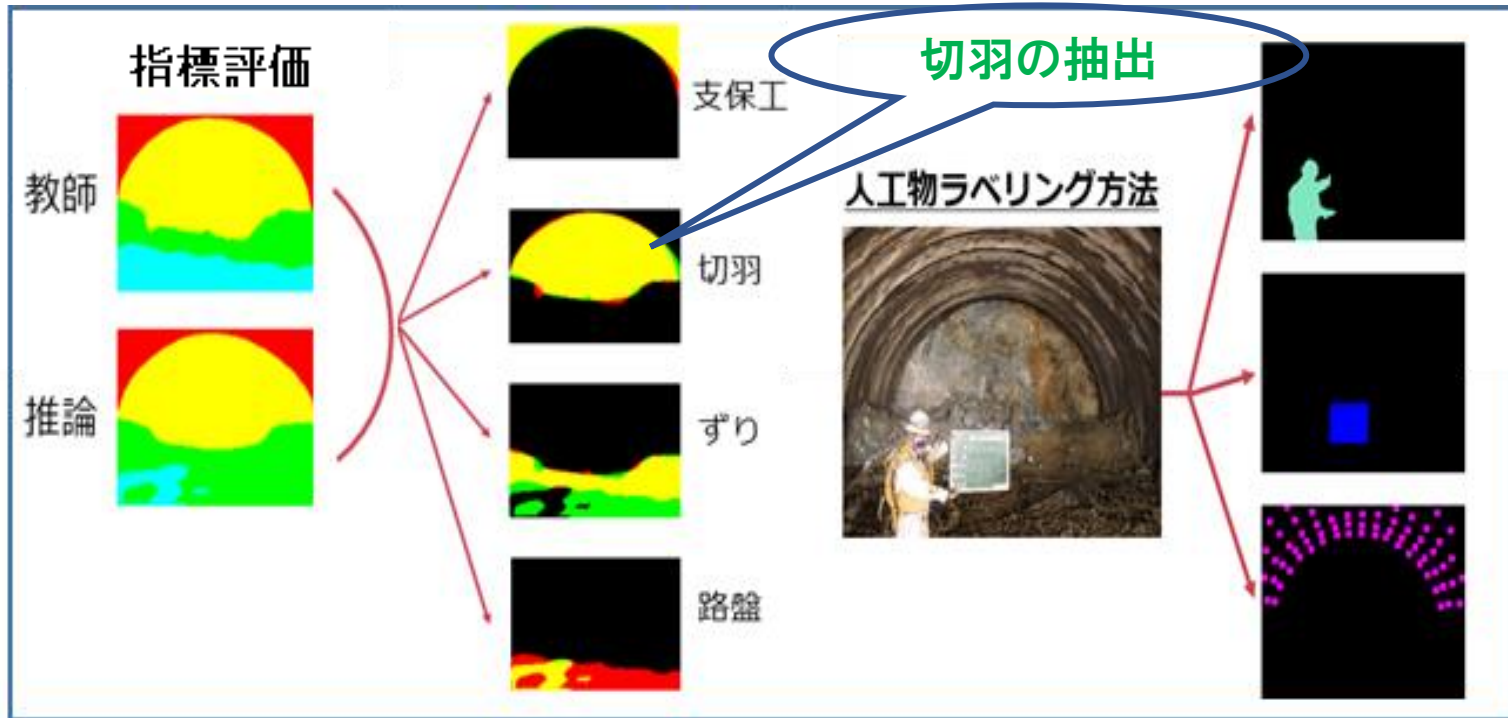
機械学習で前処理

切羽画像から切羽、支保工等の抽出、影、黑板、鏡ボルト等の人工物を認識するシステムを構築

切羽評価プログラムに内蔵して常に前処理を行う。

(切羽の抽出により機械学習時、支保工等に基づく評価(カンニング)の防止等)

評価対象項目	使用モデル	教師データ
切羽・支保工等区分	SegNet	有
人工物ラベリング	U-Net, YOLOv3	有



切羽、支保工等区分及び人工物ラベリングシステム

③切羽画像の有効活用

機械学習で前処理

色見本を用いた切羽画像の色補正システムを構築

切羽評価プログラムに内蔵し、岩判定、地質変化時に使用して色補正する。

➡色見本は当初、8色、次に10色➡A3版の白黒(現場でコピー手作り可能)とした。

➡画像全体のRedの階調値の引き下げ、補色関係にあるBlue、Greenの階調値の引き上げ等の画像処理を行う。

(カメラの撮影モード、投光器や坑内照明の違い(白熱電球、蛍光灯、LED)で色合いが変化する)

研究開発タイプ①



研究開発タイプ②



③最終：白黒



色見本の色定義(RGB表記)

色	Red	Green	Blue
黒	0	0	0
白	255	255	255

補正前

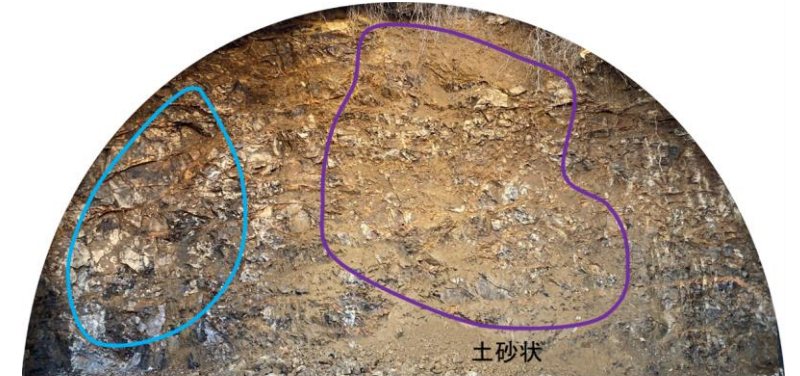
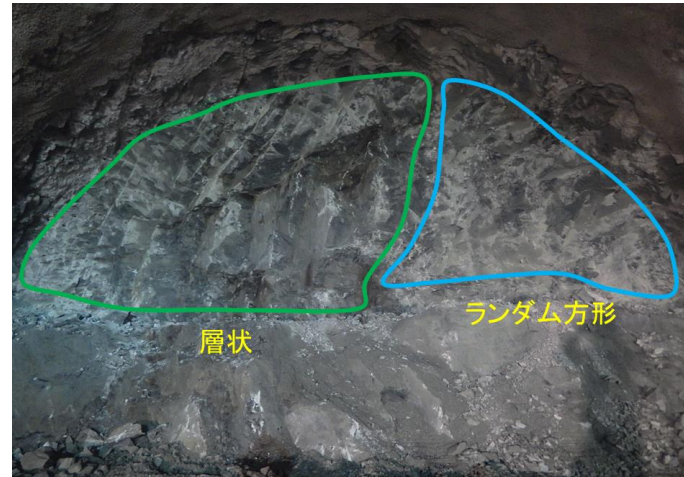


補正後



④ AIを活用した切羽地質評価の支援システム

切羽評価用の教師データ作成



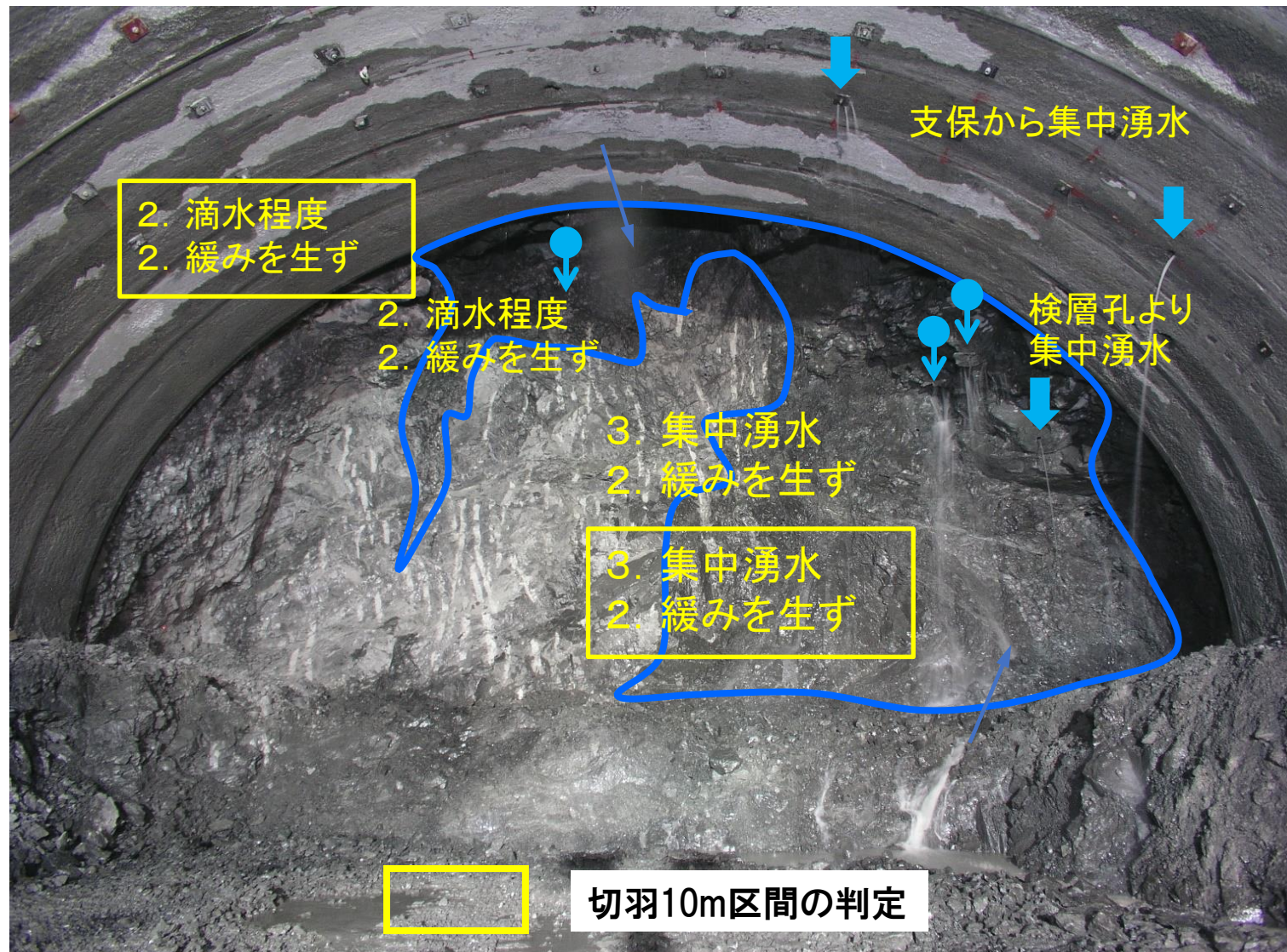
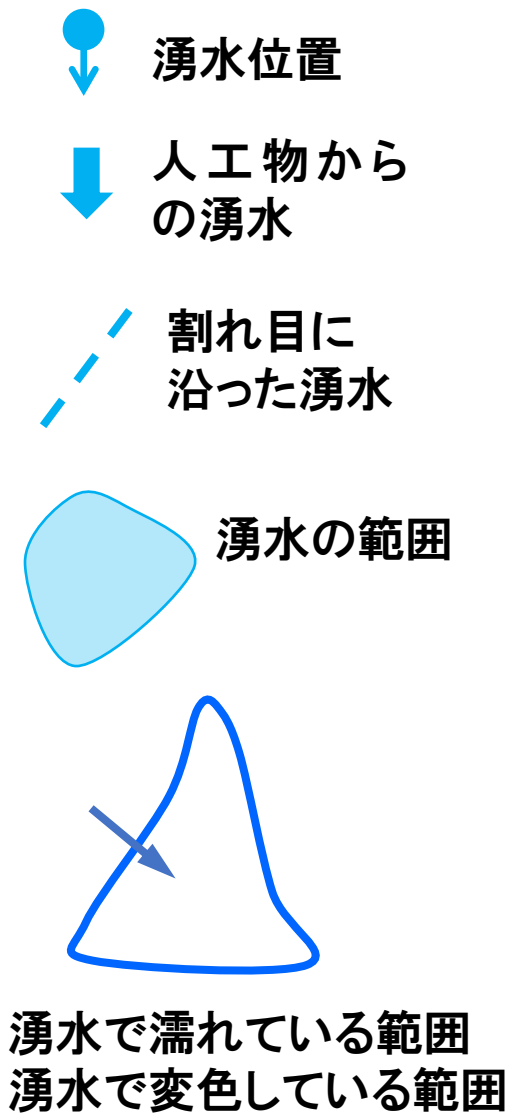
切羽評価用の教師データ(割れ目形態)の例



切羽評価用の教師データ(割れ目のスケッチ)の例

④ AIを活用した切羽地質評価の支援システム

切羽評価用の教師データ作成



切羽評価用の教師データ(湧水・水による劣化)の例

④ 既往及び新規の切羽画像の機械学習の試行

↳ 最適な機械学習等のモデルの選定・実施

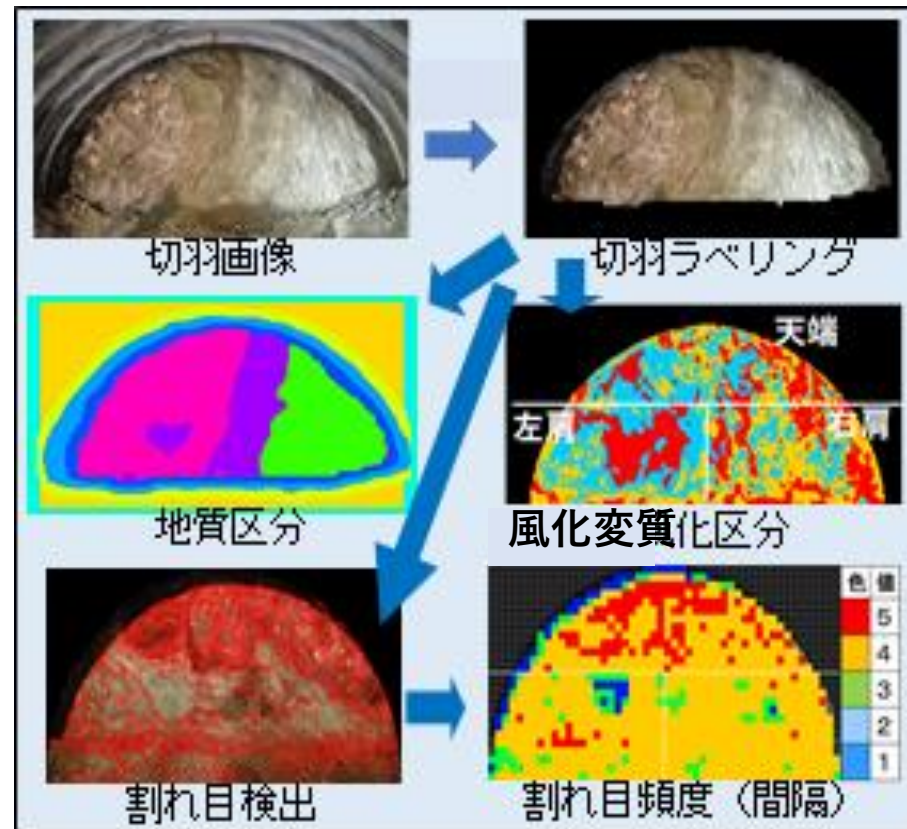
・地質区分、風化区分、割れ目の頻度については、教師データ無

☞ 切羽の状態、素掘り面の状態、圧縮強度、割れ目の状態、割れ目の形態、湧水、水による劣化については、地質の専門家が教師データを作成した。

☞ それぞれ下表の機械学習モデルで図面化、点数化を図った。

評価対象項目毎の使用モデルと教師データ有無

評価項目	使用モデル	教師データ
地質区分	IIC	無
A.切羽の状態 B.素掘り面の状態 C.圧縮強度	ECA-NFNet-L0	有
D.風化変質	K-means	無
E.割れ目の頻度	Canny法	無
F.割れ目の状態 G.割れ目の形態 H.湧水 I.水による劣化	ECA-NFNet-L0	有



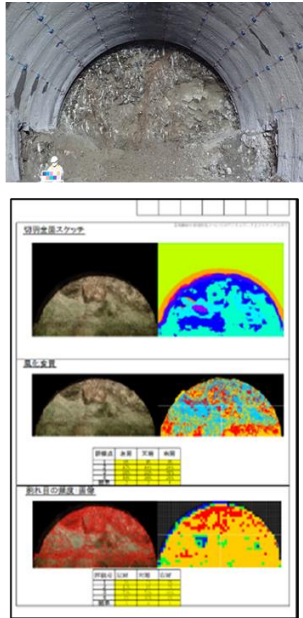
評価対象項目別の出力例

④ AIを活用した切羽地質評価の支援システム

現場技術者は、現場で切羽を観察しながら、タブレットまたは、PC等に表示された出力結果を参考に切羽判定表を作成する。



出力結果



AIによる評価結果は、あくまで支援材料
判定は技術者

切羽判定表

1. 切羽

トンネル名: 新黒川トンネル (1000010)

観測年月日: 令和 2年 12月 22日

測点: No. + n

断面番号: No.

坑口からの距離: n

土張り高さ: n

地質地帯: n

担当者: 佐藤 太郎 (中級技師 地質系)

観測状況: <切羽> 湧水量: 0 L/min 色: 湧水箇所: <切羽全面> 湧水量: L/min 色:

切羽に良好な部分と劣悪な部分が存在する場合は、目「(a)圧縮強度」、「(b)割れ目の頻度」を詳細する場合は適用

劣悪な部分の割合が50%以上の場合は劣悪な部分で評価、劣悪な部分の割合が10%以下の場合はその劣悪な部分で評価、劣悪な部分の割合が10%~50% → 両者の劣悪な部分で評価

図 1: 土中観測断面 B: 掘削機

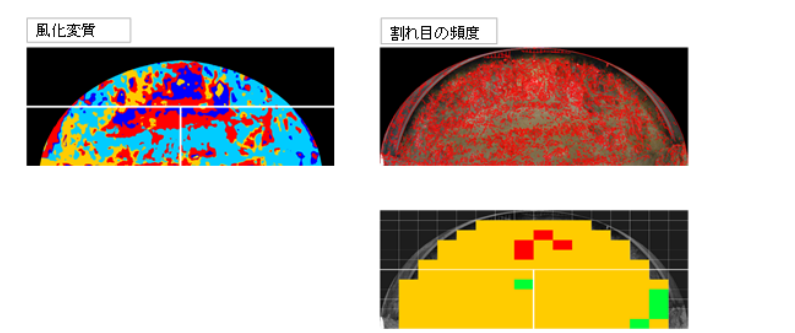
2. 切羽観察要領

評価区分 (掘削地点の地山の状態と姿勢)

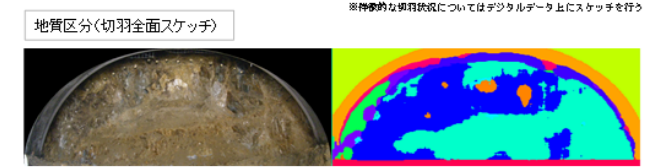
評価区分	評価区分				
	左肩	天端	右肩		
(a) 切羽の状態	1. 安定	2. 掘削から岩塊が落ちる	3. 掘削の押し出しを伴う	4. 掘削は自立せず崩れ、あるいは流出	5. その他
(b) 掘削面の状態	1. 自立 (巻簾不要)	2. 時間がつつと詰め肌落ちする (巻簾)	3. 自立困難掘削初期に支持する (巻簾)	4. 掘削に先行して山を支けておく必要がある	
(c) 圧縮強度	1. $0 \leq \sigma < 100 \text{MPa}$ ハンマー打撃はなせる	2. $100 \text{MPa} < \sigma < 20 \text{MPa}$ ハンマー打撃も弾ける	3. $20 \text{MPa} > \sigma < 50 \text{MPa}$ 軽い打撃も弾ける	4. $50 \text{MPa} > \sigma$ ハンマー打撃いこむ	
(d) 風化変質	1. なし・健全	2. 岩面に沿って変色、剥皮や欠損	3. 全体に変色、強度相当地に低下	4. 土砂状、粘土状、砂状、当初より木固帯	
(e) 割れ目の頻度	1. 間隔 $\leq 1 \text{m}$ 割れ目なし	2. $1 \text{m} > \text{間隔} \geq 20 \text{cm}$	3. $20 \text{cm} > \text{間隔} \geq 5 \text{cm}$	4. $5 \text{cm} > \text{間隔}$ 砂状当初より木固帯	
(f) 割れ目の状態	1. 巻簾	2. 部分的に開口	3. 開口	4. 粘土を挟む、当初より木固帯	
(g) 割れ目の形態	1. ランダム形状	2. 放射状	3. 層状、片状、板状	4. 土砂状、層片状、当初より木固帯	
(h) 湧水	1. なし・砂水強度	2. 湧水強度	3. 霧中湧水	4. 全面湧水	
(i) 水による劣化	1. なし	2. 跡みを生ず	3. 軟弱化	4. 崩壊、流出	
面割れ目のある方向と方位角	1. 水準 ($10^\circ > \theta > 0^\circ$) 2. さし目 ($30^\circ > \theta > 10^\circ$, $60^\circ > \theta > 30^\circ$) 3. さし目 ($60^\circ > \theta > 30^\circ$) 4. 浅れ目 ($60^\circ > \theta > 30^\circ$) 5. 浅れ目 ($30^\circ > \theta > 10^\circ$, $60^\circ > \theta > 30^\circ$) 6. 垂直 ($\theta > 60^\circ$) (掘削面の見かけの傾斜角をとる)				
面割れ目のある方向と方位角	1. 水準 ($10^\circ > \theta > 0^\circ$) 2. 右から左へ ($30^\circ > \theta > 10^\circ$, $60^\circ > \theta > 30^\circ$) 3. 右から左へ ($60^\circ > \theta > 30^\circ$) 4. 左から右へ ($30^\circ > \theta > 10^\circ$, $60^\circ > \theta > 30^\circ$) 5. 左から右へ ($60^\circ > \theta > 30^\circ$) 6. 水平 ($\theta > 60^\circ$) (掘削面の見かけの傾斜角をとる)				

3. 火薬量

評価項目・区分	1	2	3	4	5	評価区分	
火薬量	火薬量	1.0kg/m ³ 以上	B割当(1.0kg/m ³)	C割当(0.8kg/m ³)	D割当(0.6kg/m ³)	0.6kg/m ³ 以下	5



AI判定評価点と判定比率



切羽の状態: 評価点

評価点	左肩	天端	右肩
1	28%	31%	21%
2	17%	37%	19%
3	20%	16%	19%
4	35%	16%	41%
結果	4	2	4

掘削面の状態: 評価点

評価点	左肩	天端	右肩
1	10%	13%	8%
2	9%	19%	9%
3	16%	55%	14%
4	65%	13%	69%
結果	4	3	4

圧縮強度: 評価点

評価点	左肩	天端	右肩
1	8%	17%	9%
2	11%	18%	13%
3	12%	40%	13%
4	69%	25%	65%
結果	4	3	4

風化変質: 評価点

評価点	左肩	天端	右肩
1	7%	17%	7%
2	7%	16%	12%
3	9%	22%	11%
4	77%	46%	70%
結果	4	4	4

割れ目の頻度: 評価点

評価点	左肩	天端	右肩
1	9%	15%	8%
2	10%	20%	16%
3	22%	29%	21%
4	60%	36%	55%
結果	4	4	4

割れ目の状態: 評価点

評価点	左肩	天端	右肩
1	10%	10%	8%
2	9%	10%	10%
3	18%	42%	11%
4	64%	38%	71%
結果	4	3	4

割れ目の形態: 評価点

評価点	左肩	天端	右肩
1	24%	21%	54%
2	10%	21%	7%
3	32%	20%	18%
4	34%	38%	22%
結果	4	4	1

湧水: 評価点

評価点	左肩	天端	右肩
1	24%	18%	24%
2	27%	46%	27%
3	25%	23%	24%
4	23%	13%	26%
結果	2	2	2

水による劣化: 評価点

評価点	左肩	天端	右肩
1	17%	9%	13%
2	29%	24%	29%
3	35%	40%	47%
4	19%	27%	11%
結果	3	3	3

④ AIを活用した切羽地質評価の支援システム

↳ 岩石グループごとに学習を実施



岩石グループ	トンネル数	切羽写真/ 観察記録枚数
硬質塊状	5	1149
中硬質塊状	5	953
軟質塊状	8	3712
中硬質層状	7	2616
軟質層状	13	4153
合計	38	12583

👉 仕様モデルの変更や前の切羽の評価活用など地質技術者が結果を検証して改良した。

● プロトタイプ②版の評価例

	切羽の 状態	素掘面 の状態	圧縮 強度	風化 変質	割れ目 の頻度	割れ目の 状態	割れ目の 形態	湧水	水による劣化
一致	0.77	0.75	0.73	0.39	0.42	0.11	0.10	0.61	-
±1許容	0.89	0.90	0.94	0.81	0.93	0.86		0.96	-

● 改良版(前2切羽の評価結果を活用)の例


	切羽の 状態	素掘面 の状態	圧縮 強度	風化 変質	割れ目の 頻度	割れ目の 状態	割れ目の 形態	湧水	水による劣化
一致	0.77	0.77	0.67	0.60	0.25	0.77	0.71	0.48	0.60
±1許容	0.92	0.95	0.95	0.95	0.77	0.98		0.99	0.96

切羽観察表 (国土交通省仕様)

AIによる切羽観察表 [全岩質共通]

1. 切羽基礎情報

トンネル名	写真ファイル名 (000018)
観察年月日	令和 2年 12月 22日
測点	坑: + n
断面番号	坑: n
坑口からの距離	n
土盛り高さ	n
地質地層	
岩石名	地質時代: 中新世 区分: 岩石グループ: 分析モデル (中硬質砂岩 凝灰岩)
湧水状況	<切羽> 湧水量: 0 L/min 色: 湧水箇所: <切羽全体> 湧水量: L/min 色:



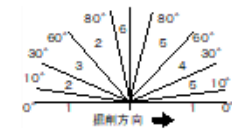
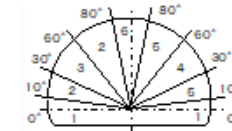
切羽に良好な部分と劣悪な部分が混在する場合の見方

※ 「(C) 圧縮強度」、(D) 風化変質」、「(E) 割れ目の程度」を評価する場合に適用

劣悪な部分が1区以上の割合→劣悪な部分で評価
劣悪な部分が1区以下の割合→その他の良好な部分で評価
劣悪な部分が1区→3区 → 両者の平均的な部分で評価

(注) H: 上半部高さ B: 掘削幅

2. 切羽観察記録

評価区分 (掘削地点の地山の状態と挙動)	評価区分		
	左層/天端	右層	
(A) 切羽の状態	1. 安定 2. 断面から岩塊が抜け落ちる 3. 断面の押し出しを生じる 4. 断面は自立せず崩れ、あるいは流出 5. その他	4 2 4	
(B) 素掘面の状態	1. 自立 (巻簾不要) 2. 時間がたつと緩み肌落ちする (巻簾) 3. 自立困難掘削後早期に支保する (巻簾) 4. 掘削に先行して山を受けおく必要がある	4 3 4	
(C) 圧縮強度	1. $\sigma_c \geq 100\text{MPa}$ ハンマー打撃はね返る 2. $100\text{MPa} > \sigma_c \geq 20\text{MPa}$ ハンマー打撃で弾ける 3. $20\text{MPa} > \sigma_c \geq 5\text{MPa}$ 軽い打撃で弾ける 4. $5\text{MPa} \geq \sigma_c$ ハンマー刃先食いこむ	4 3 4	
(D) 風化変質	1. なし・健全 2. 岩面に沿って変色、強度やや低下 3. 全体に変色、強度相当地に低下 4. 土砂状、粘土状、破砕、当初より木固箱	4 4 4	
(E) 割れ目の程度	1. 間隔 $d \geq 1\text{m}$ 割れ目なし 2. $1\text{m} > d \geq 20\text{cm}$ 3. $20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$ 4. $5\text{cm} \geq d$ 破砕当初より木固箱	4 4 4	
(F) 割れ目の状態	1. 密着 2. 部分的に開口 3. 開口 4. 粘土を挟む、当初より木固箱	4 3 4	
(G) 割れ目の形態	1. ランダム方形 2. 柱状 3. 層状、片状、板状 4. 土砂状、細片状、当初より木固箱	4 4 1	
(H) 湧水	1. なし・滲水程度 2. 滲水程度 3. 集中湧水 4. 全面湧水	2 2 2	
(I) 水による劣化	1. なし 2. 緩みを生ず 3. 軟弱化 4. 崩壊、流出	3 3 3	
断面のれり目のある方向性 (掘削方向)	掘削方向 (切羽をみても)		2 2 2
	掘削方向 (掘削方向をみても)		5 5 5

切羽観察表 (NEXCO仕様)

記録者: _____

トンネル名: 写真ファイル名 (20191018_支保No.15) 観察年月日: _____

測点No.	坑口からの距離:	断面番号 No.	設計パターン:
土盛り高さ:	岩石名: 天	岩石グループ (1~5):	岩石名コード:
補助工法 (鏡吹き、ボルトを含む)の緒元	左	右	A, B計測
鏡吹きAGF、ロックボルト			

特殊条件・状態等: _____

崩壊の有無、状況: _____

観察項目	評価区分						評価区分記入		
	100以上	100~50	50~25	25~10	10~3	3以下	左	天端	右
A. 圧縮強度 (N/mm ²)	一軸圧縮強度	4以上	4~2	2~1	1~0.4	0.4以下			
	ハンマーの打撃による強度の目安	岩片を地面に置きハンマーで強打しても割れない。	岩片を地面に置きハンマーで強打すれば割れる。	岩片を手で持ちハンマーで叩いても割れる。	岩片をおしをたたき合わせて割ることができる。	両手で岩片を部分的に割ることができる。	力を込めれば、小さな岩片を指先で潰すことができる。		
評価区分		1	2	3	4	5	3	3	3
B. 風化変質	風化の目安	概ね新鮮	割れ目沿いに風化変質	岩芯まで風化変質	土砂状風化、未固結土砂				
	熱水変質などの目安	変質は見られない	変質により割れ目に粘土を挟む	変質により岩芯まで強度低下	著しい変質により全体が土砂状、粘土化		3	3	3
評価区分		1	2	3	4				
C. 割目間隔	割れ目の間隔	$d \geq 1\text{m}$	$1\text{m} > d \geq 50\text{cm}$	$50\text{cm} > d \geq 20\text{cm}$	$20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$	$5\text{cm} > d$			
	RQD	80以上	80~50	60~30	40~10	20以下	4	4	4
評価区分		1	2	3	4	5			
D. 割目状態	割れ目の開口	割目は密着している	割目の一部が開口している (幅 < 1mm)	割目の多くが開口している (幅 < 1mm)	割目が開口している (幅 1~5mm)	割目が開口している (幅 5mm以上)			
	割目の挟み物	なし	なし	なし	薄い粘土を挟む (5mm以下)	厚い粘土を挟む (5mm以上)			
評価区分		1	2	3	4	5	4	4	4
E. 走向傾斜	走向がトンネル軸と直角	1: 差し目 傾斜45~90°	2: 差し目 傾斜20~45°	3: 差し目 傾斜0~20°	4: 流れ目 傾斜20~45°	5: 流れ目 傾斜45~90°			
	トンネル軸と平行	1: 傾斜0~20°	2: 傾斜20~45°	3: 傾斜45~90°					
切羽10m区間での湧水量と水による劣化状態による評価 (劣化は現在および将来における可能性について判定する)									
F. 湧水量	状態	なし、滲水1L/分以下	滴水程度1~20L/分	集中湧水1~100L/分	全面湧水100L/分以上				
	評価区分	1	2	3	4	2	2	2	
G. 劣化	水による劣化	なし	緩みを生ず	軟弱化	流出				
	評価区分	1	2	3	4	1	1	1	

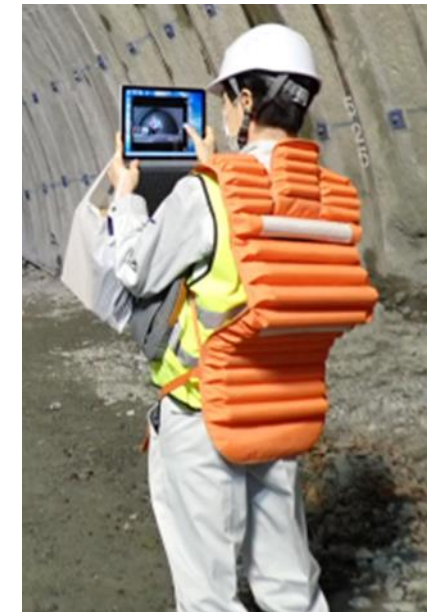
湧水による調整点: _____

合計: _____

切羽評価点 = _____

評価点 = (左+天端×2+右) ÷ 4

AIによる評価結果はあくまで支援材料
判定は技術者



④ AIを活用した切羽地質評価の支援システム(令和2年度)

↳ 走行傾斜(割れ目の方向性)の判定支援(Metashapeでの静止画像の3D合成)

切羽中心から左へ1m離れ



切羽正面の入力画像3枚
切羽中心像



切羽中心から右へ1m離れ



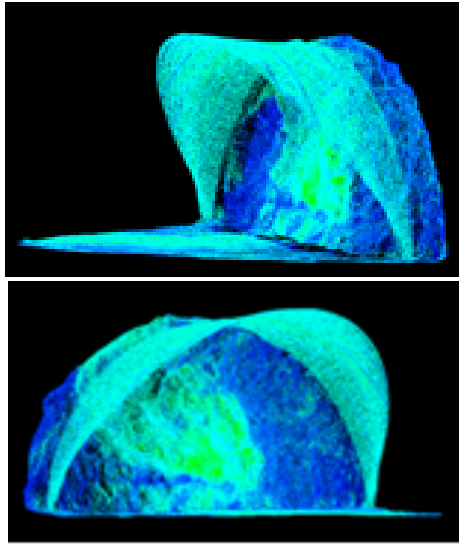
3D合成画像(metashape)



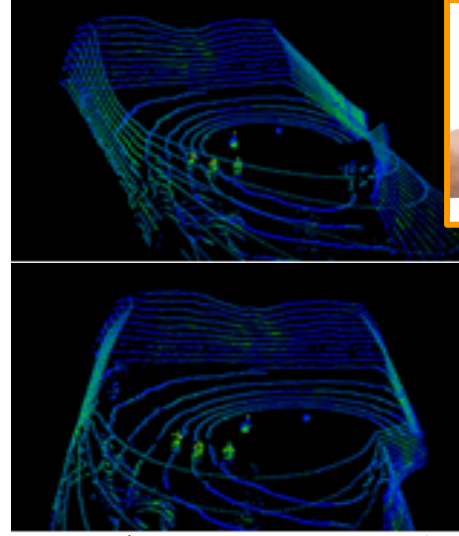
⑤ICTツールの活用検討(LiDAR他による3D画像)(令和元～3年度)

↳ 割れ目の方向性への適用検討(コストデメリット等で断念)

LiDAR(Livox avia)



LiDAR((Velodyne VLP-16)



Metashape(静止画3枚)



2種類のLiDAR及び3枚の静止画像3D画像作成例
2種類のLiDAR及び3枚の静止画像3D画像の特徴

手法	メリット	デメリット
Livox Avia	<ul style="list-style-type: none"> ・価格が比較的安価 ・三脚使用で±2cm程度の測定精度 	<ul style="list-style-type: none"> ・点群のみでテクスチャー無し ・三脚とPCのセッティング
Velodyne VLP-16	<ul style="list-style-type: none"> ・±3cm程度の精度 ・360度の広範囲, 約100mの距離まで測定可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・全方位LiDARのため、切羽面の点群数が少ない →トンネル切羽に不向き
Metashape 静止画3枚	<ul style="list-style-type: none"> ・汎用カメラで切羽画像の撮影可能 ・ソフト手持ち撮影可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・高コスト ・一部の場所で20cm程の誤差発生

↳ 走行傾斜(割れ目の方向性)の評価に使える3D画像の作成は可能

↳ B/C(手間とコスト)を考慮すると現場技術者の目視観察で十分かつ有効と判断し、Metashapeの使用を断念した。

⑤ICTツールの活用検討(LiDAR他による3D画像)(令和3年度)

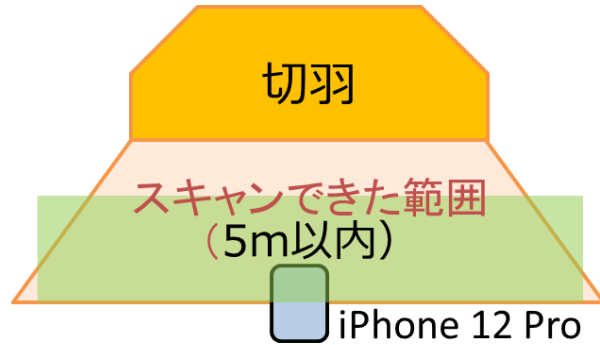
汎用機器(iPhone)付属のLiDARの試用

➡iPhone 12 Proによる3D合成



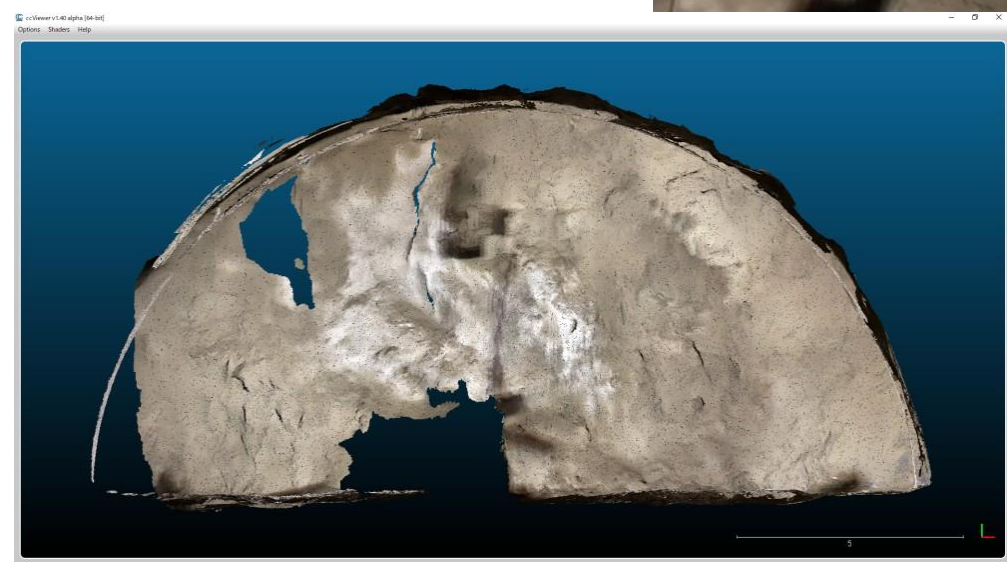
①切羽からの20m以上離れた位置で左右に移動して撮影

👉レーザ画像検出が可能な距離約5mの範囲のみの3D画像の生成を確認した。



②高所作業車で切羽面から離隔約5mで移動して切羽全面を棒に取り付けたPhoneを手でなぞって撮影した場合

👉ほぼ切羽全面の3D画像生成の可能性を確認した。
👉レーザ画像検出可能距離が20m以上になれば、切羽の3D画像の作成に使える。



⑤ICTツール(赤外線カメラ)の活用検討(令和元~2年度)

↳湧水の判定への適用検討(切羽画像未取得・断念)

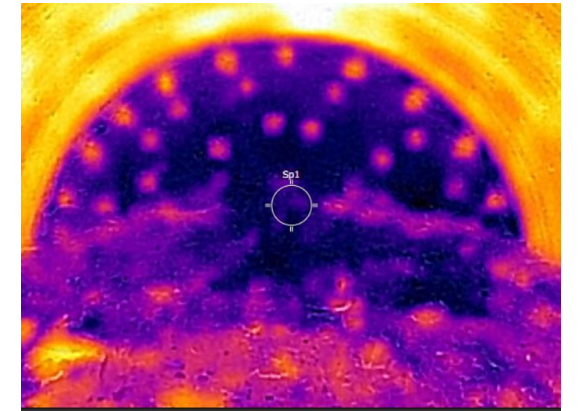
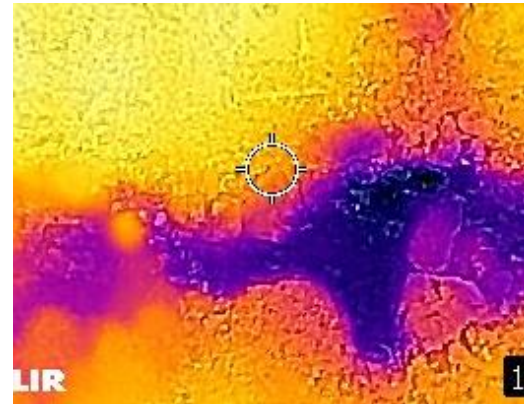
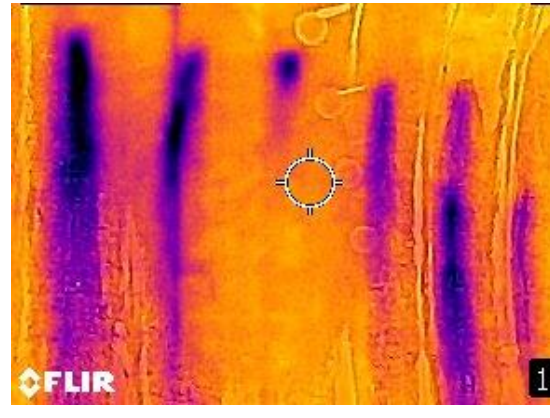
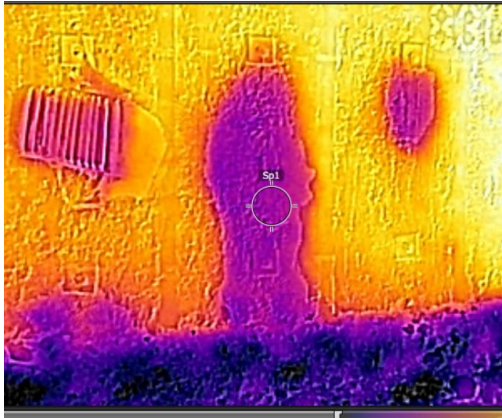
二次吹付けコンクリートの赤外線カメラによる湧水評価例



測定対象	温度℃		
二次吹付け	19.8	18.8	18.6
鋼製支保工	18.6	18.5	18.4
漏水(紫色)	15.2	15.1	15.0
滲み(薄紫色)	15.9	15.6	15.6
仮排水路の流水	13.3	13.1	13.1

発破直後の切羽の温度評価例

測定対象	温度℃		
切羽(地色)	18.5	18.3	17.9
切羽(孔尻)	20.0	19.0	18.9
ずり(高温部)	16.0	16.0	15.9
ずり(低温部)	14.7	14.5	14.3



- ・目視できる漏水であれば、赤外線カメラの色と数値から場所の特定は可能である。
- ・発破後、切羽は冷却される。一方、湧水量が多ければこそ多くの段階でさらに冷却される。
- ・先受け、前方探査、水抜きなどの工事による切羽面の水環境の乱れ、地下水温・換気温度の季節変動も生じるので、赤外線詳細な計測・分析が必要である。

↳ 研究開発期間中の調査対象トンネルでは、湧水は見られず(少しの滲み程度)評価・分析用のデータの取得が困難であるため、更なる活用検討を断念した。

Parrot Anafi ドローン
動画空撮
(Adobe Premiere Pro
動画編集:解像度低下)



現場A ドローン4K撮影

Parrot Anafi ドローン
動画空撮(一部肌落ち)

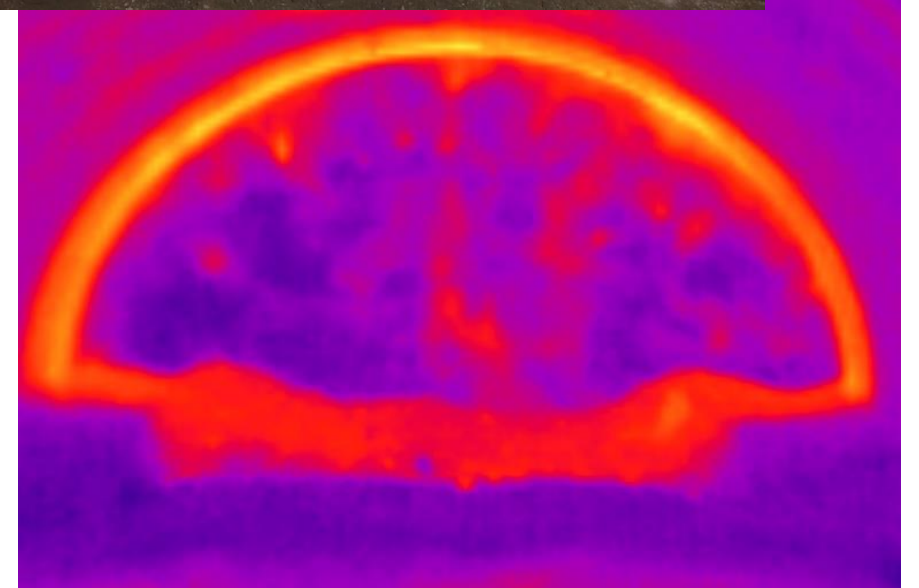
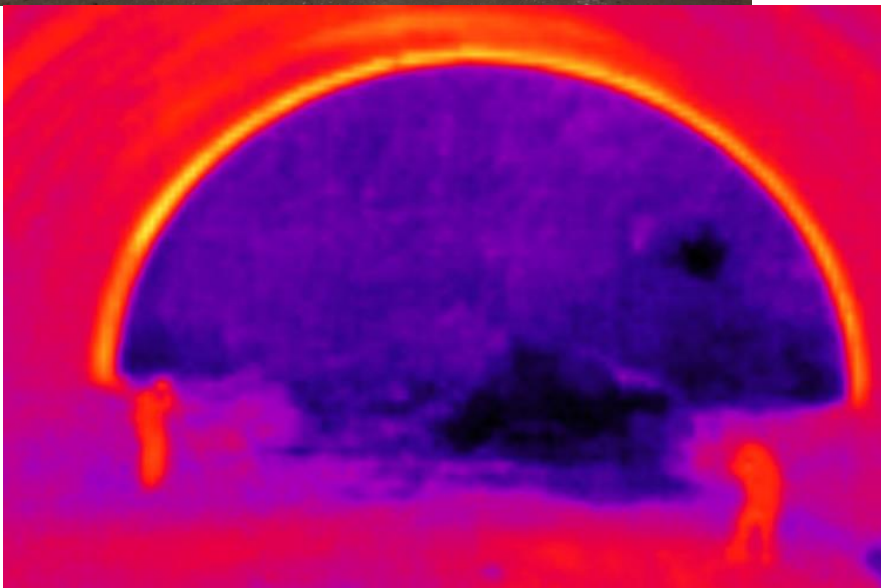
(Adobe Premiere Pro
動画編集:解像度低下)

ドローン(Parrot Anafi)の活用検討(切羽静止画と赤外線画像)

こそく後

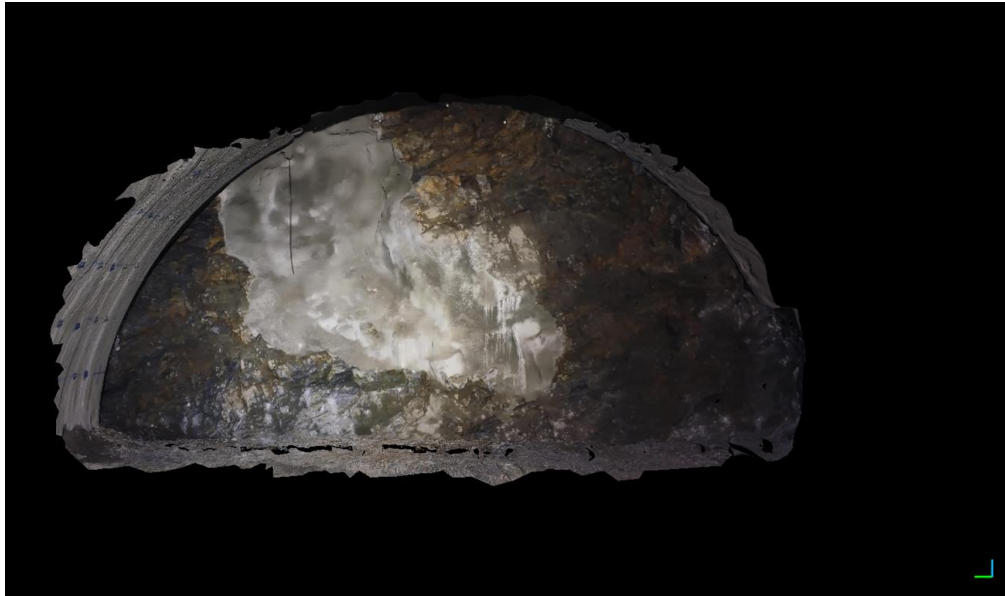


鏡吹付け後

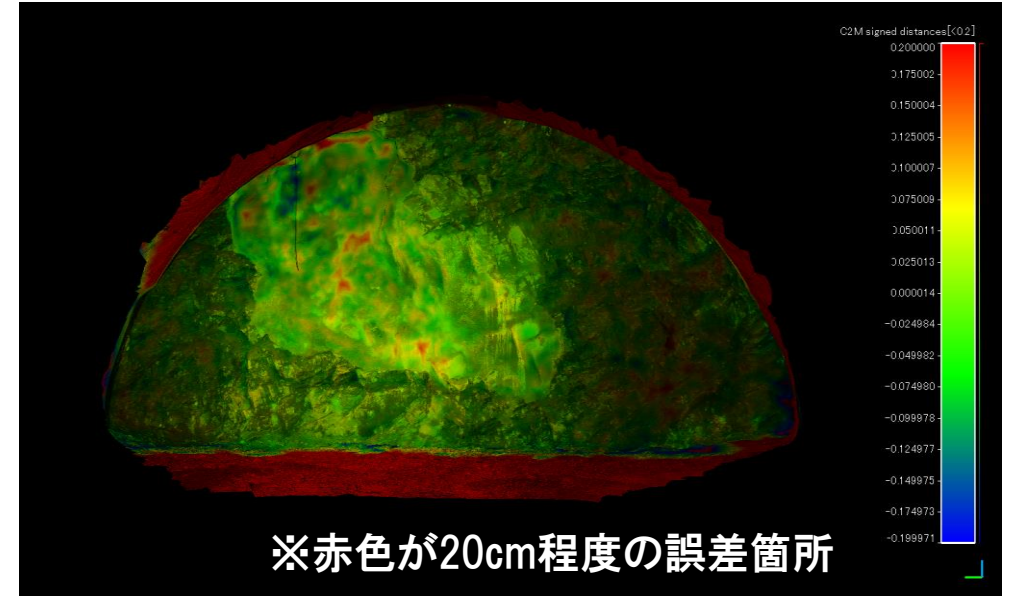


ドローンParrot Anafi)の活用検討(Metashapeによる静止画像の3D合成)

動画から静止画667枚の3D合成画像



静止画の3D合成の精度(667枚・3枚凹凸差分)

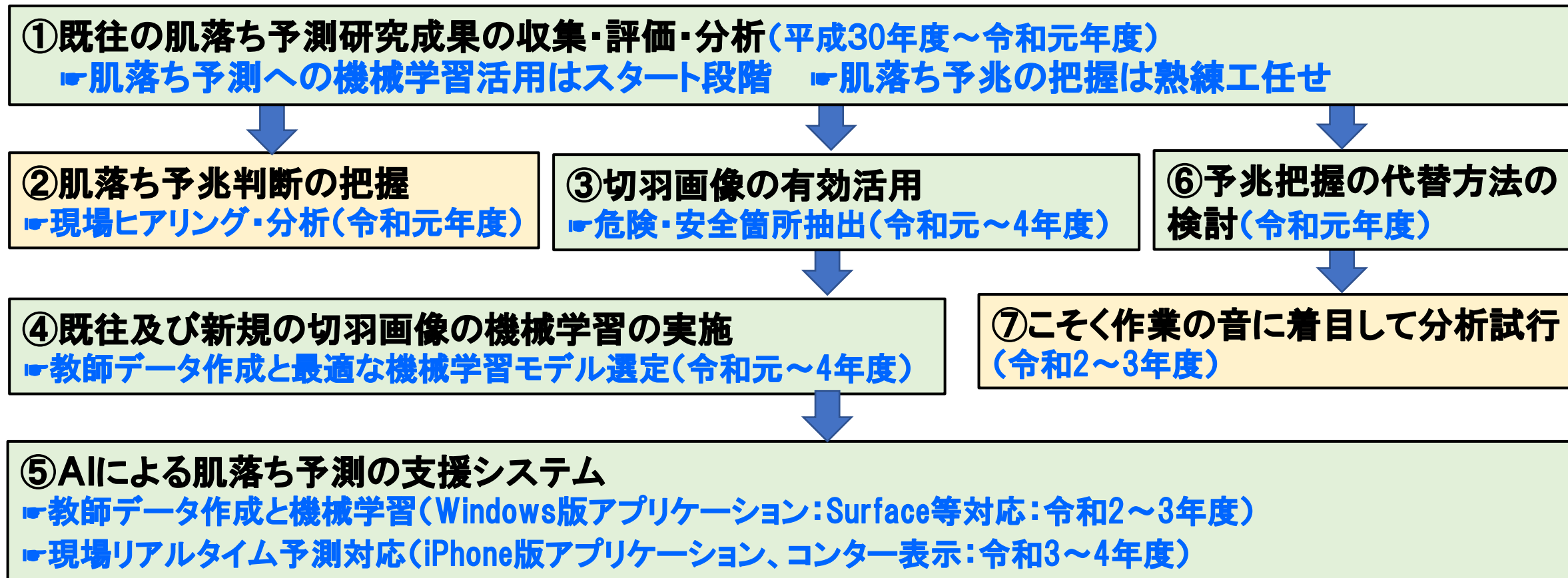


※ドローンの活用について(Parrot Anafiの使用の範囲でのコメント)

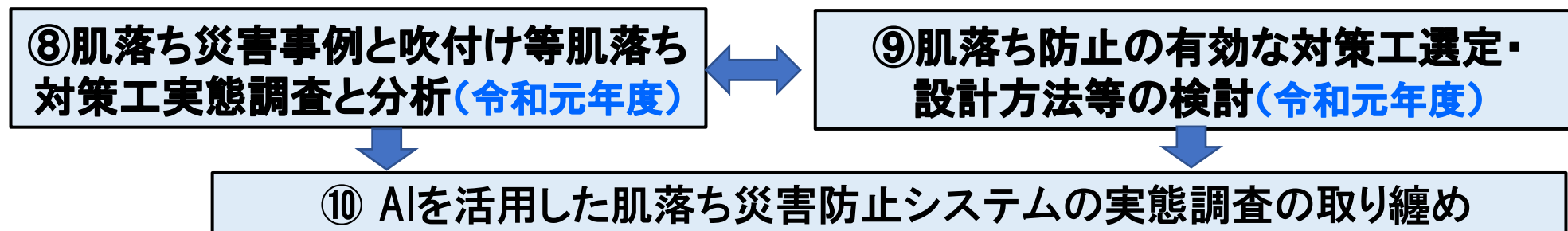
- ・山岳トンネル切羽付近の環境下で安定した飛行並びに良好な画像の撮影が可能である。
- ・動画(4K)と静止画(2100万画)でAIによる切羽評価に活用可能な画像の撮影ができる。
- ・FLIRのサーモカメラが搭載されていて、切羽、吹付けコンクリートなどの温度測定が可能であり、種々の評価分析が可能である。

- 👉 現在、人が行っている切羽撮影を遠隔あるいは自動撮影することで、切羽評価、後述の肌落ち予測などを安全にリアルタイムに実施できる可能性がある。
- 👉 人が近づけない、あるいは固定カメラでは撮影が難しい切羽の天井部や側部も撮影することで、こそくや吹付け状況の確認に使える可能性がある。
- 👉 例えば、iPhone等のLiDAR機能が向上すれば、簡易に安く点群データや3D画像の取得ができる可能性がある。

(2) AIによる肌落ち予測支援システム研究開発フロー



(3) 肌落ち災害及び防止システムの実態調査のフロー



2) AIによる肌落ち予測支援システム

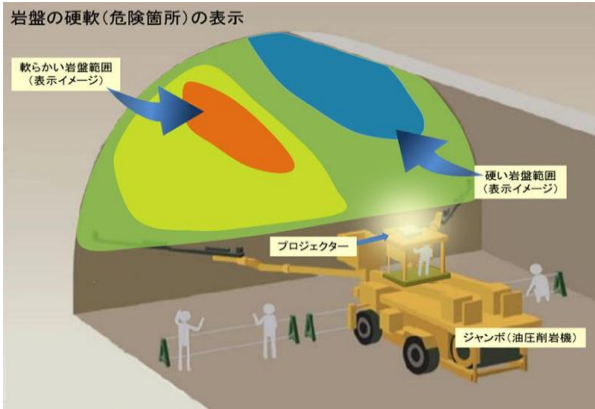
① 既往の肌落ち予測研究成果の収集・評価・分析

▣ 肌落ち予測への機械学習活用はスタート段階(平成30年当時)

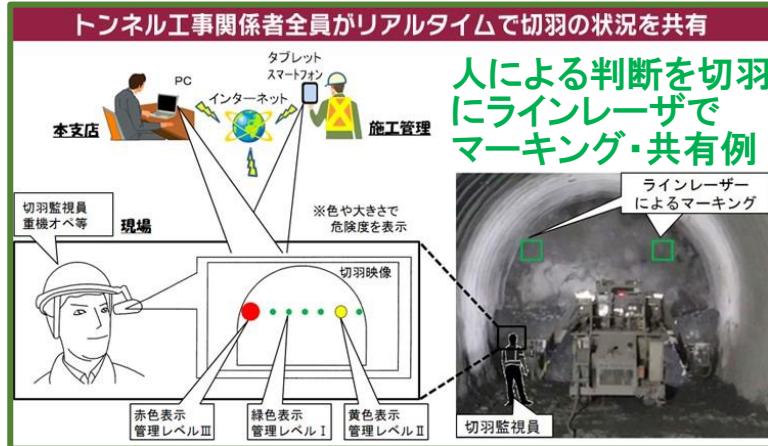
- ・コンセプトの発表が多い
- ・肌落ち予測に一部を除いて切羽画像は使われていない。

プロジェクションマッピング
切羽への地盤情報投影例

削孔データ及び切羽画像
から危険箇所予測例



切羽監視レーダーシステム例



- ・肌落ちは発生時の注意喚起では遅い!
 - ・事前の予兆の把握と迅速な対処が不可欠!
- 👉 切羽画像の有効活用して肌落ち予測を行う方向とした。

(2) AIによる肌落ち予測支援システム

②肌落ち予兆判断の把握 ⑤予兆把握の代替方法の検討(令和元年度)

現場ヒアリング・分析(令和元年度に実施、令和2年度は新型コロナで中止)

肌落ち予兆の把握は熟練工任せ

熟練工は肌落ち予兆の着目点整理・五感との紐づけ

3現場 15名の熟練工

熟練作業員は肌落ちを視覚で判断(30項目中26項目)

切羽画像から肌落ちを予測する方向で検討する。

切羽画像以外から得られる情報

例

穿孔作業時の情報

こそく作業時の情報

音の情報

温度の情報

バックホウのブレードやバケットで触って浮き、打音等からも判断

⑥こそく作業の音に着目して分析試行

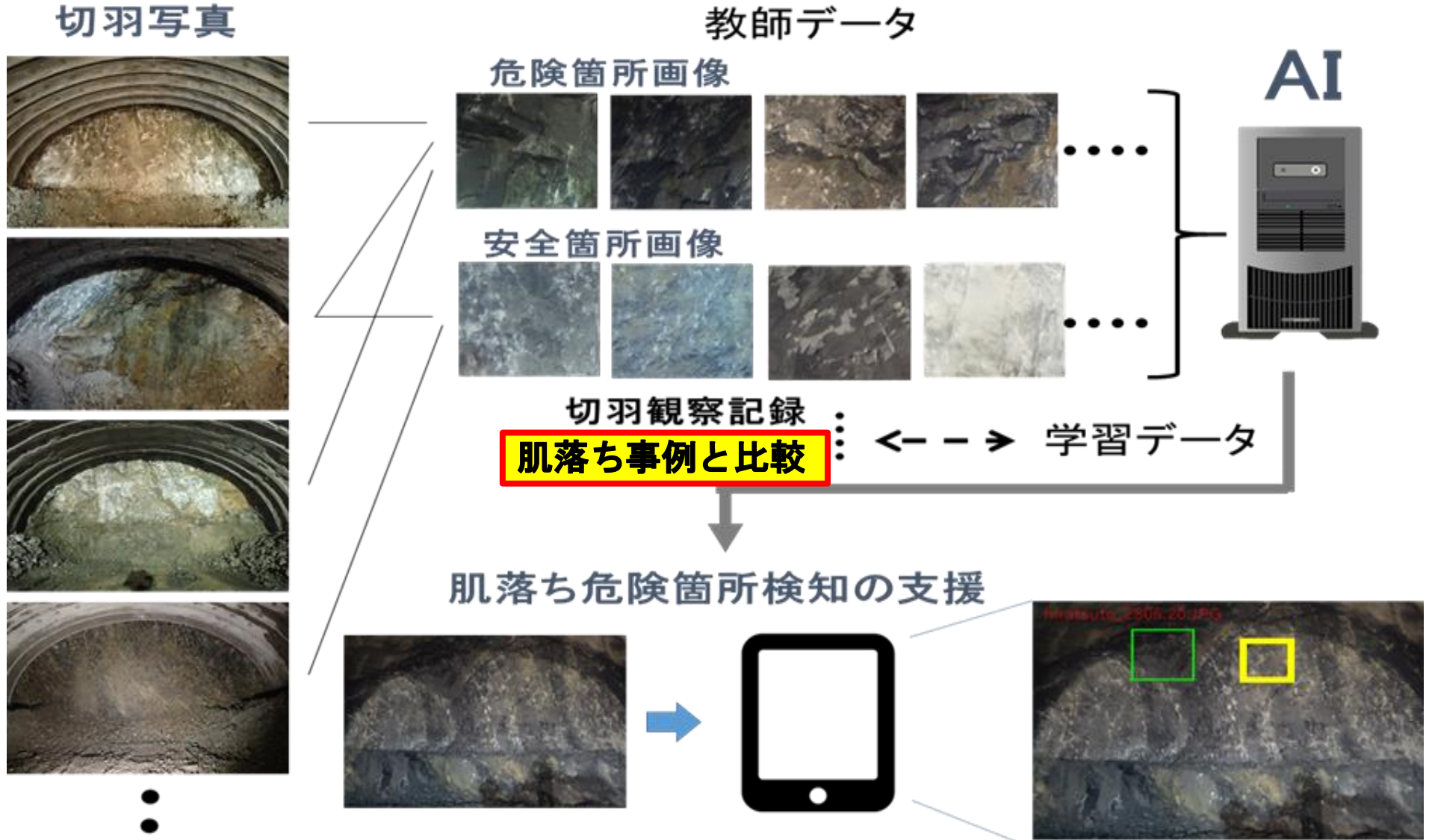
工種	No	熟練作業員の五感						地盤工學上の現象	
		ヒアリング結果(熟練作業員の着目点)	視	聴	触	嗅	味		他
こそく作業時	1	石の落ち方	○					○	肌落ち・切羽崩落の予兆
	2	亀裂の目	○						同左による切羽鏡面崩壊(すべり)
	3	岩の割れ方	○						肌落ち・切羽崩落の予兆
	4	バラバラと不安定で止まらない	○					○	肌落ち・切羽崩落の予兆
	5	ポソポソとしている	○		○			○	浮き石の存在, 周辺地山の緩み, 肌落ち・切羽崩落予兆
	6	ブレードの音	○	○				○	浮石の存在, 岩質の硬軟の混在
	7	ブレードのノミで一通り切羽を触ってみて確認	○	○	○			○	浮石の存在, 岩質の硬軟の混在
	8	バックホウで浮石を探る	○	○	○			○	浮石の存在, 岩質の硬軟の混在
切り羽だ観し察す時	9	互層状態(挟在粘土)	○						同左による切羽鏡面崩壊(すべり)
	10	亀裂の方向, 幅, 交叉, 目, ブロック形状などの変化	○					○	肌落ち・切羽崩落の予兆
	11	層の変わり目(特に硬質から軟質)	○		○			○	同左による切羽鏡面崩壊(すべり)
	12	切羽面が湿っていると要注意	○		○			○	突発湧水, 切羽の滑り
	13	水の濁り	○					○	微粒分の流出
	14	変化点, すべり目, さし目, 油目, 粘土層, 玉石層等	○					○	同左による肌落ち・切羽崩落
吹付け	15	吹付けまで素掘り状態で切羽が自立しない							肌落ち・切羽崩壊予兆, 周辺地山ゆるみ, 地山強度低下
	16	吹付け面の色の変化	○						吹付け面の強度低下, 湧水の存在
	17	吹付けがつかない	○						地山強度低下, 湧水, 均等係数低下(砂質土)
穿孔および装薬時	18	穿孔時に地山を緩める	○	○	○			○	地山強度低下(風化, 土砂化)
	19	穿孔水が悪影響を及ぼす			○			○	切羽面強度低下, 泥岩スレーキング, 膨張性地山緩み
	20	穿孔水を出すとところが詰まる	○		○			○	粘土層の高い確率での存在
	21	穿孔水が別のところから出てくる	○	○	○			○	亀裂の存在, 地山の緩み
	22	穿孔箇所とは別の箇所が崩れてくる	○					○	肌落ち, 切羽崩落の誘発, 地山強度低下, 地山の緩み
	23	時間が経過すると, 穿孔時に浮いたと	○					○	肌落ち, 切羽崩落の誘発
	24	穿孔しているときの硬軟			○			○	切羽面の強度差による肌落ち・切羽崩落
	25	穿孔水の状況の変化	○					○	微粒分の流出による肌落ち・切羽崩落
	26	穿孔時のフィード圧や穿孔時間等の	○		○				切羽面の強度差による肌落ち・切羽崩落
	27	吹付面のクラック進展	○					○	切羽面の押出, すべり, 切羽崩壊の予兆
	28	吹付面の裏の水	○					○	湧水, 吹付け背面水位上昇・切羽不安定化, 切羽崩落
他その	29	ロックボルト座金の変状	○						変位増大, 周辺地山緩み, 地圧増加, 塑性地山, 肌落ち
	30	インバートストラットの押上げ	○						膨張性地山, 盤膨れ, トンネル断面の変形

※他は, 第六感, 長年の経験による直感や勘など

③切羽画像の有効活用

危険・安全箇所抽出(令和元～3年度)

- 👉 地質の専門技術者が切羽画像から肌落ち危険箇所と安全箇所の教師データを抽出した。
- 👉 教師データと実際の肌落ち事例とを比較して、教師データの妥当性を検証した。



③肌落ち予測への切羽画像の有効活用

地質専門技術者による教師データ作成

危険・安全箇所を抽出した。

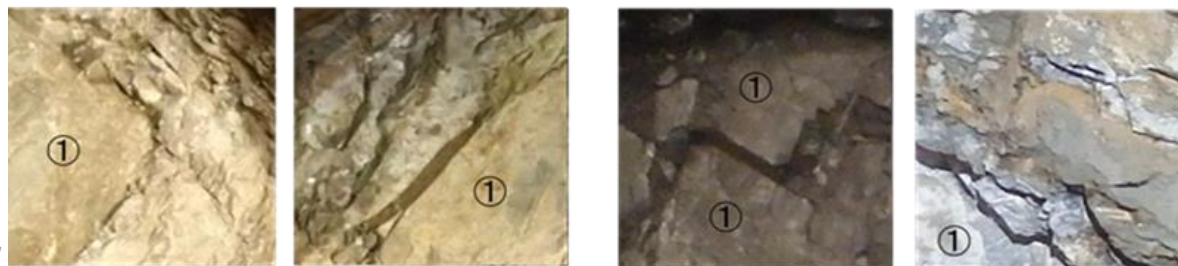
● 危険個所の抽出判定区分

パターン
トンネル外周部
岩塊の抜け落ち跡
割れ目に沿って切羽凸凹
割れ目細かく入る
割れ目に粘土・介在物
周囲より風化・変色, 風化・変色著しい
破碎帯, 破碎状, 土砂化
滲水, 湧水あり
その他

● 安定個所(肌落ちを否定する教師データ)の抽出判定区分

パターン
割れ目なし
割れ目密着
切羽面の凸凹なし, 少ない

①の面に沿って岩塊が落下した跡



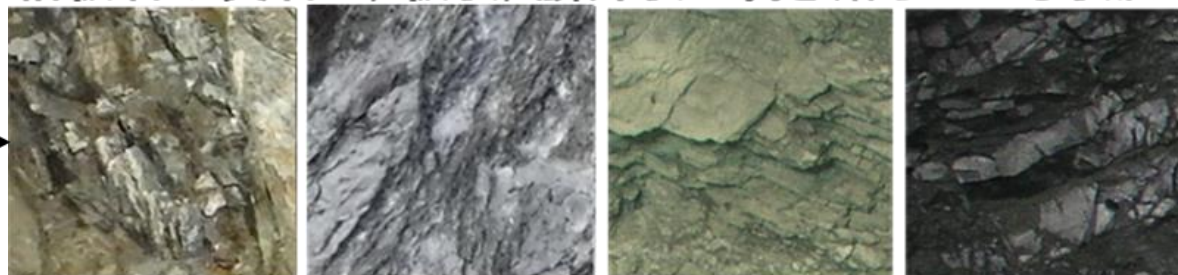
花崗閃緑岩

花崗閃緑岩

粘板岩

砂岩

粘板岩や頁岩で, 板状, 鱗片状に剥ぎ落ちている状況



割れ目, 岩塊が風化, 茶褐色に変色, 安山岩



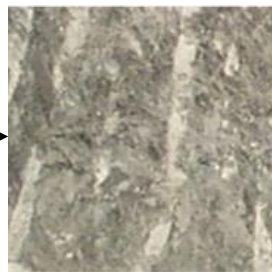
花崗閃緑岩



花崗閃緑岩



風化が進行, 岩塊の強度の低下が顕著, 粘板岩



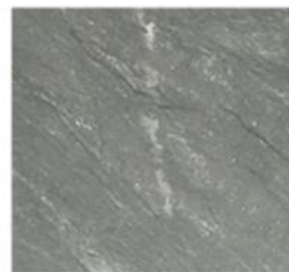
砂岩・泥岩互層



砂岩・泥岩互層



粘板岩



粘板岩

地質の専門技術者による危険個所の教師データ抽出時の着目点(令和2年度)



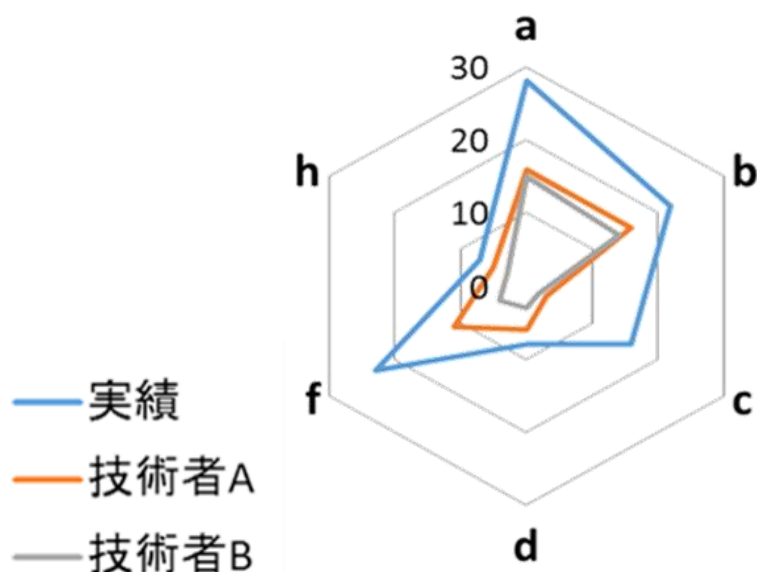
- a. 肌落ち箇所がトンネル外周部に位置する
- b. 割れ目に沿って岩塊の抜け落ち跡あり
- c. 割れ目に沿って切羽面が凹凸している
- d. 割れ目が細かく入る
- e. 周囲より変色、風化あるいは両方が著しい
- f. 滲水、漏水あり



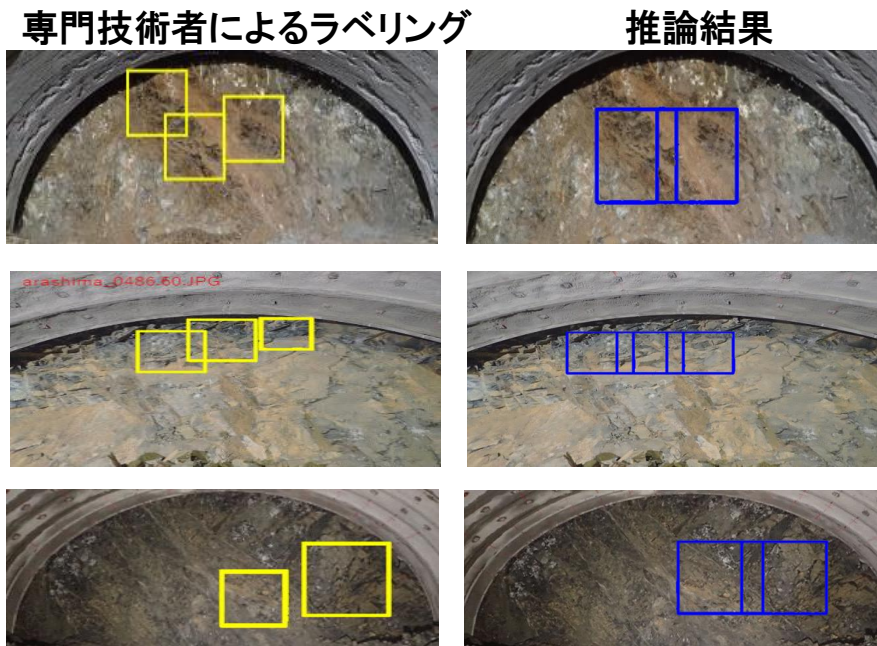
④ 既往及び新規の切羽画像の機械学習の実施(令和2~4年度)

機械学習結果と実際の肌落ち事例との比較

👍 肌落ち予測システムが示す予測領域は、地質の専門技術者が判定した予測領域と傾向が似ており、ある程度の精度で推論できていると判断した。



地質の専門技術者によるラベリングと実績比較



肌落ち推定結果の比較例

⑤ AIによる肌落ち予測の支援システム

教師データ作成と機械学習(Windows版アプリケーション:Surface等対応)(令和2~3年度)

肌落ち危険箇所予測結果



マッチングし、予測
画像をSurface
映像に重ねた画像



Surfaceの背面
カメラの映像



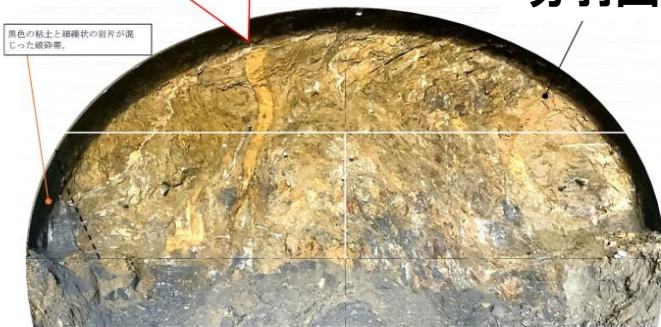
共同研究4社の現場の撮影機器
5割以上がiPhoneを使用

現場リアルタイム予測対応(iPhone撮影と同モニターへの危険箇所・危険度表示)(令和3~4年度)

【No. 43】

切羽全体が不安定、肌落ち頻発

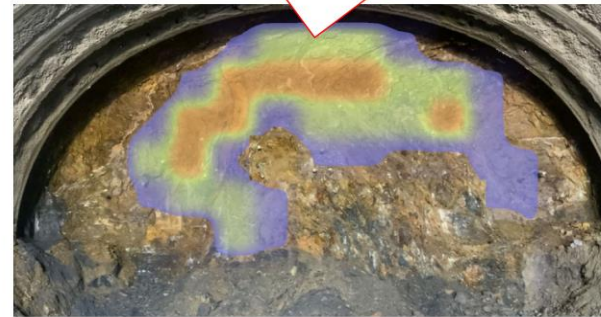
切羽画像



黒色の粘土と繊維状の岩片が混じった成層帯。

・肌落ち AI で大きく検出(最もよく予測できている)

判定結果



現場で試行の結果

- ・写真撮影から判定まで数秒と短く予測が速い。朝礼夕礼の切羽情報引継ぎに有効に使える!
- ・実際との正答率は2~6割程度。

👉 感度、閾値の調整方法の最適化と画像他新たな教師データ収集と再学習で正答率の向上を図る。



切羽画像取り込み→現場撮影

⑥こそく作業の音に着目して分析試行

2現場でブレイカー作業の動画撮影し、音部分を目視で確認し、機械学習用に切り出して分析

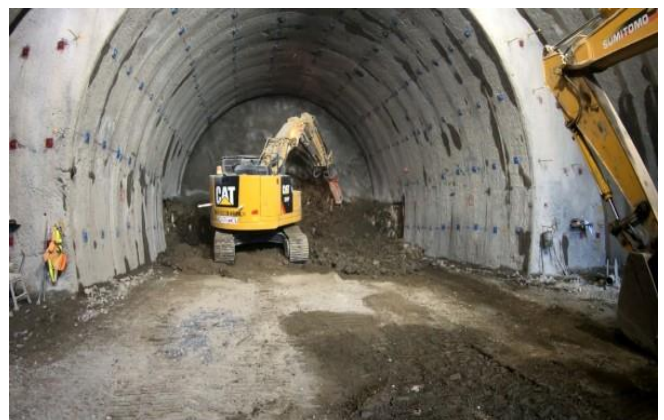
HandyCam定点撮影
16動画 各約10～90分



ウェアラブルカメラ
2動画各約20分



オペレータや監視員装着の
GoPro 31動画・各約8分



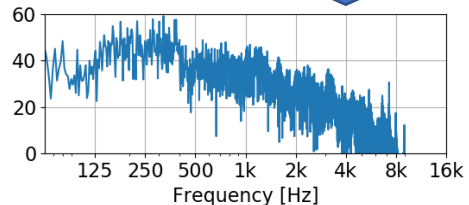
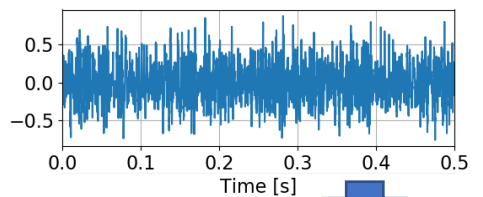
▶動画からブレーカー音部分を目視で確認し、機械学習用に切り出して分析



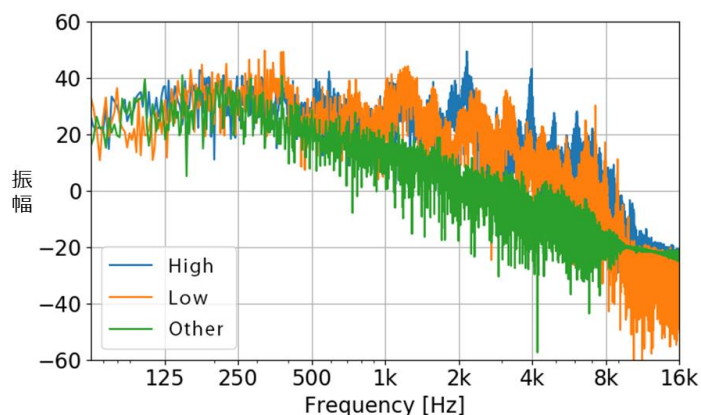
⑥こそく作業の音に着目して分析試行

ブレイカー作業の音に着目して分析試行

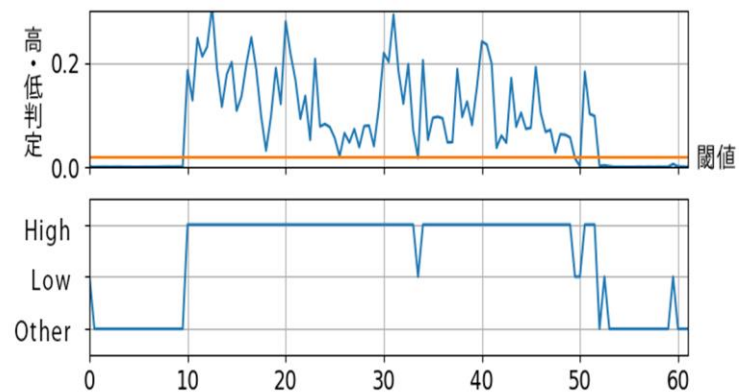
i. 周波数への変換による学習 (試行例)



低音 (重機) とブレイカー音 (高音) 選別



周波数500Hz以上で高音・低音比較



(2~2.2k + 3.9~4 k成分) / 2k以上成分の「低音」、「高音」の判定例

ii. 複数の録音機器による学習 (試行例)



HandyCam & ガンマイクのデータを分析

HandyCam 16動画



ウェアラブルカメラ 2動画

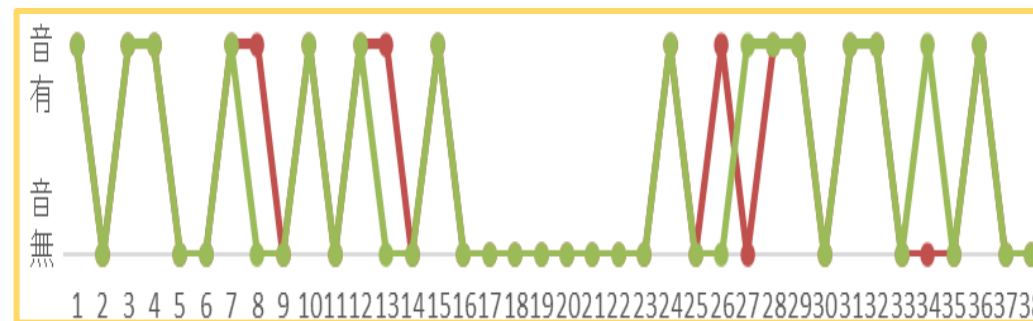


GoPro (オペレータ・監視員装着) 31動画

- 20-1000Hz 帯の低周波帯の特性比較の有効性把握
- 人が聞こえない周波数帯、機器別フィルタ 処理や圧縮、データ削除あり

人間の耳による分類 (人カプロット)

信号処理による分類 500Hz以上の成分 ÷ 全体



人の耳と信号処理の比較例

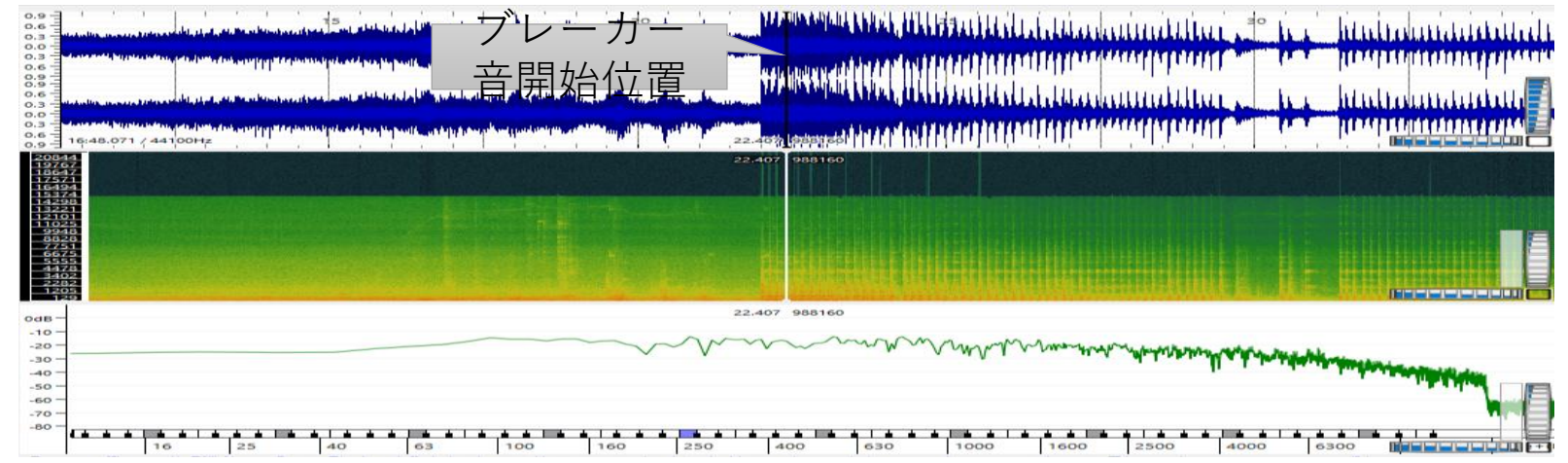
特徴	大半が低めのブレーカー音	大半が高めのブレーカー音	大半が重機音、一部高めのブレーカー音
			

ブレーカー音発生時の音圧、周波数傾向

Waveform
横軸: 時間
縦軸: dB

Spectrogram 時間
縦軸: 周波数
色: 信号成分の強さ

Spectrum
横軸: 周波数
縦軸: dB



- ・音源の正確な録音は、ガンマイク付きのHandyCamで可能だが、大容量データ処理に多大な労力が必要である。
- ・作業内容の分類は可能だが、岩種、風化、割れ目などの情報の分類・組合せは難解である。

👉 聴覚の代替録画録音と評価分析作業は難解であり、視覚の代替の画像による肌落ち予測に絞る。

(3) 肌落ち災害及び防止システムの実態調査

⑧ 肌落ち災害事例と吹付け等肌落ち対策工実態調査と分析

肌落ち災害の実態を調査し、分析、取り纏め

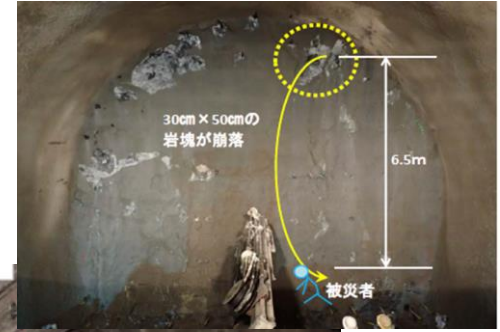
肌落ち災害の分析 計131件

4社実績 24件 (2010~2019)
 鹿島 11件、戸田 6件、清水 4件 安藤間 3件

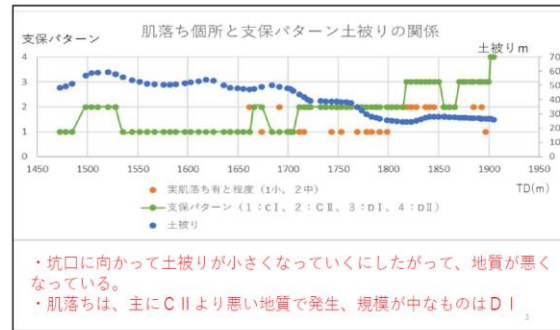
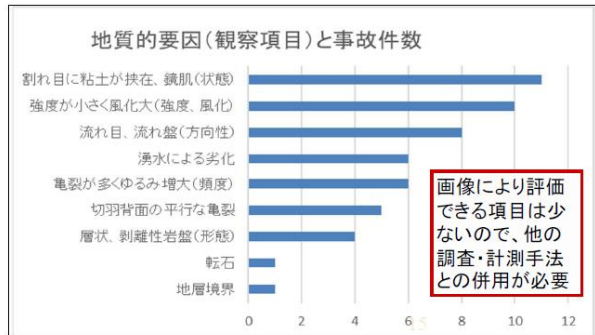
その他文献 (1994~2018)
 ・HP、日経コンストラクション、旧土工協等 14件
 ・労働安全衛生研究所HP 23件 (2000年~2016年死亡事故)
 ・トンネル工事における労働災害事例とその対策 (平成31年3月3日) 日本トンネル専門工事業協会 (2011年~2017年) 26件
 ・トンネル工事における肌落ち労働災害防止のハンドブックその2 (平成24年4月) 日本トンネル専門工事業協会 (2000年~2010年) 44件

災害・事故事例

1 災害・事故発生状況	2 災害発生状況図	3 調査分析														
<p>ヘルメットに石が当たった拍子に転んで右手薬指に打撲を負う</p> <table border="1"> <tr> <th>災害種別</th> <th>発生場所</th> <th>発生年月</th> <th>発生時刻</th> <th>発生場所</th> <th>発生状況</th> <th>被害状況</th> </tr> <tr> <td>落石</td> <td>切羽</td> <td>2019年10月</td> <td>14時</td> <td>トンネル内</td> <td>切羽崩落</td> <td>右手薬指に打撲</td> </tr> </table>	災害種別	発生場所	発生年月	発生時刻	発生場所	発生状況	被害状況	落石	切羽	2019年10月	14時	トンネル内	切羽崩落	右手薬指に打撲		<p>問題: 切羽崩落による落石が発生した。ヘルメットに当たった拍子に転倒し、右手薬指に打撲を負った。</p> <p>原因: 切羽崩落による落石が発生した。ヘルメットに当たった拍子に転倒し、右手薬指に打撲を負った。</p>
災害種別	発生場所	発生年月	発生時刻	発生場所	発生状況	被害状況										
落石	切羽	2019年10月	14時	トンネル内	切羽崩落	右手薬指に打撲										



実態調査結果の分析例



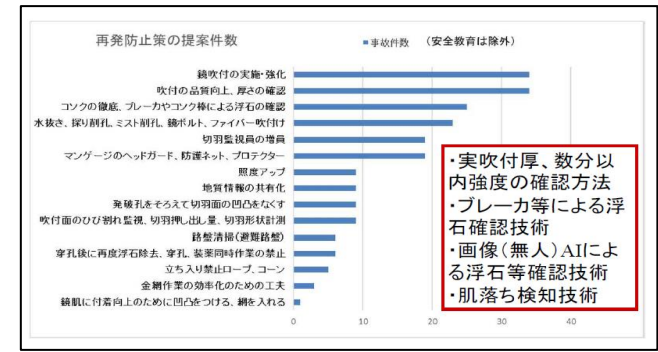
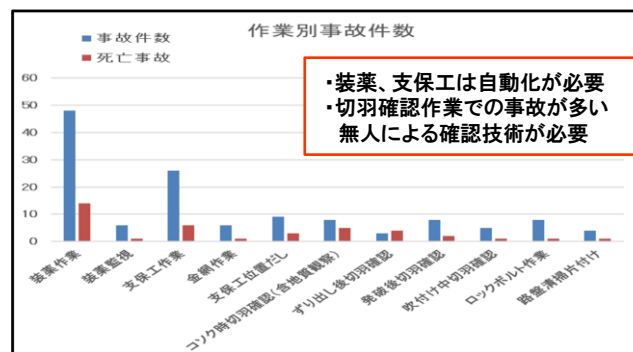
⑨ 肌落ち防止の有効な対策工選定・設計方法等の検討

対策工の有効性を評価、設計方法と実測方法を取り纏め

肌落ち (吹付剥落実績) 予測肌落ち箇所 比較

地質関連入力項目

- 切羽観察簿の切羽基礎情報
 TD 土被り 切羽湧水 支保パターン
- 切羽観察記録 1-4
 切羽の状態 素掘り面の状態 圧縮強度 風化変質 割れ目の頻度 割れ目の状態 割れ目の形態 湧水 水による劣化 割れ目の方向性縦断 割れ目の方向性横断 平均評価点
- その他 1-5
 火薬量 ずり最大径 ずり平均径 最大余掘り 平均余掘り 掘削面状況 余掘り面状況 切羽の形態



⑩ AIを活用した肌落ち災害防止システムの実態調査の取り纏め

トンネル切羽変状可視化システム [記事](#)

本技術は、山岳トンネル工事において「[記事](#)」や「崩落・崩壊」の兆候をリアルタイムに捉えて事前に知らせる警報発信システム。

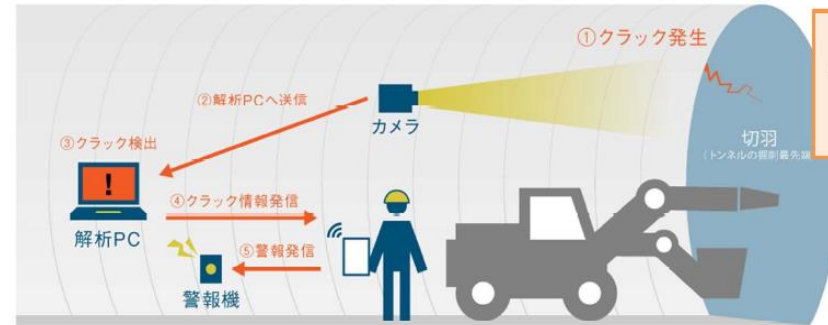


＜特徴補記＞
ARゴーグルで結果
閲覧
演算は現場PC

「トンネル切羽変状可視化システム」の概要

クラック検出サポートシステム [記事1](#), [記事2](#)

切羽付近に取り付けられたカメラで [記事1](#), [記事2](#) 画像をクラック検出のための解析PCでリアルタイムに解析し、肌落ち等の前兆の可能性を検出した場合、切羽監視員のタブレット端末へ当該情報を伝達する。

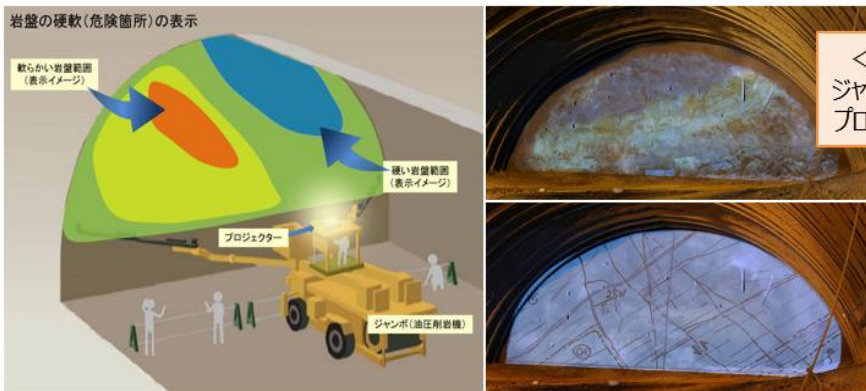


＜特徴補記＞
タブレットは結果閲覧用
演算は現場PC

切羽監視員
手元のタブレット端末で
クラック情報を確認

切羽プロジェクションマッピング [記事](#)

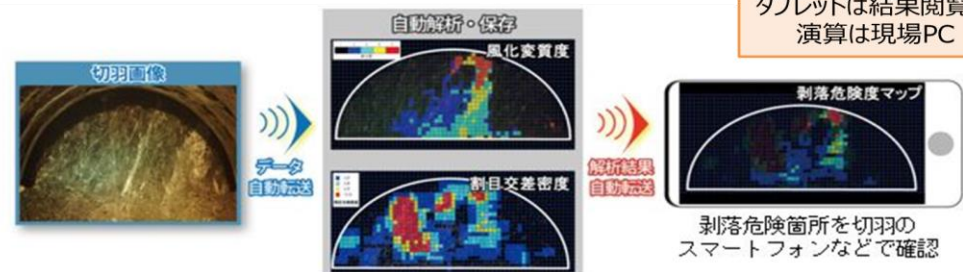
切羽に実物大写真やスケッチ、地盤の硬軟等がわかるコンター図を投影することで各作業員と地盤情報が共有できるようになり、山岳トンネル工事における安全性や効率性の向上が可能となります。



＜特徴補記＞
ジャンボに積載した
プロジェクタで投影

スマート切羽ウォッチャー [記事](#)

デジタルカメラで切羽を撮影した画像データを解析し、岩盤の風化度合や割れ目の分布などを定量的に評価、剥落の可能性のある箇所を検出します。解析結果は、切羽で作業する社員や作業員のスマートフォンに約10秒で転送され、危険箇所の見落としを防止します。



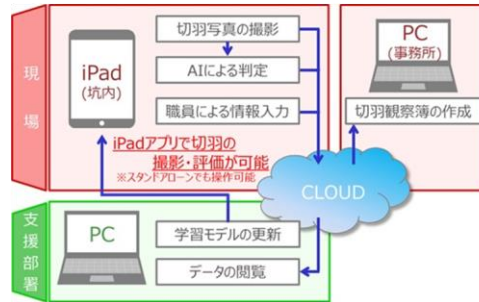
＜特徴補記＞
タブレットは結果閲覧用
演算は現場PC

剥落危険箇所を切羽の
スマートフォンなどで確認

⑩ AIを活用した肌落ち災害防止システムの実態調査の取り纏め

切羽評価システム [記事1](#), [記事2](#), [記事3](#)

タブレットで切羽写真を撮影し、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、AIエンジンをアプリに組み込むことで、スタンドアロンでも動作する仕様としている。



＜特徴補記＞
タブレット単体で撮影、演算、表示が可能

切羽地質情報取得システム [記事1](#), [記事2](#)

専用の計測車両には、マルチスペクトルカメラ、スチレオカメラ、ハロゲン照明、制御PCなどのデバイスが搭載されます。タブレット端末から制御PCを通じて各デバイスに作業指示を出すことで、数分の短い時間で切羽データを取得します。取得したデータは制御PCにて演算処理され、処理結果が、即座にタブレット端末に転送されます。



＜特徴補記＞
タブレットは作業指示と結果閲覧用
演算は車載PC

AI切羽評価支援システム [記事](#)

本システムは、人間の脳が日常的に行っている学習（経験したものを記憶：学習システム）と判定（新しく見たものを判断：判定システム）のメカニズムを、コンピューター上でモデル化したものです。学習システムで作成したAIの判定モデルを使い、切羽評価を行います。



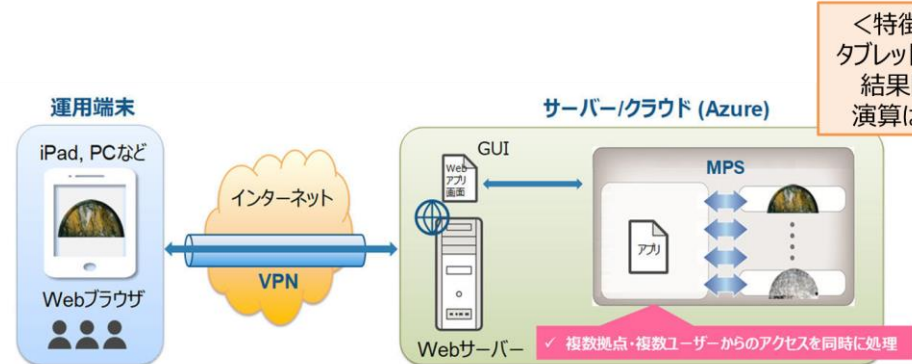
- ①モデル選択フォーム
- ②画像選択フォーム
- ③選択した画像一覧
- ④予測開始ボタン
- ⑤予測結果表示欄
B: 風化変質
C: 割目開閉
D: 割目状態
- ⑥コンソール

＜特徴補記＞
PC用アプリ

図-1 AI切羽評価支援システムのパソコン操作画面(判定システム)

切羽評価システム [記事](#)

タブレット端末などで切羽画像を撮影しクラウドにアップロードすることで、全7項目のうち選択した項目について直ちに解析し評価を返信します。



＜特徴補記＞
タブレットは撮影と結果閲覧用
演算はクラウド

* MPS: MATLAB® Production Server™
VPN: Virtual Private Network

切羽画像等切羽評価データ集計システム、AIを活用した切羽評価及び肌落ち予測・支援の活用・展開のイメージ ※研究開発助成応募(令和元年度)資料に追記

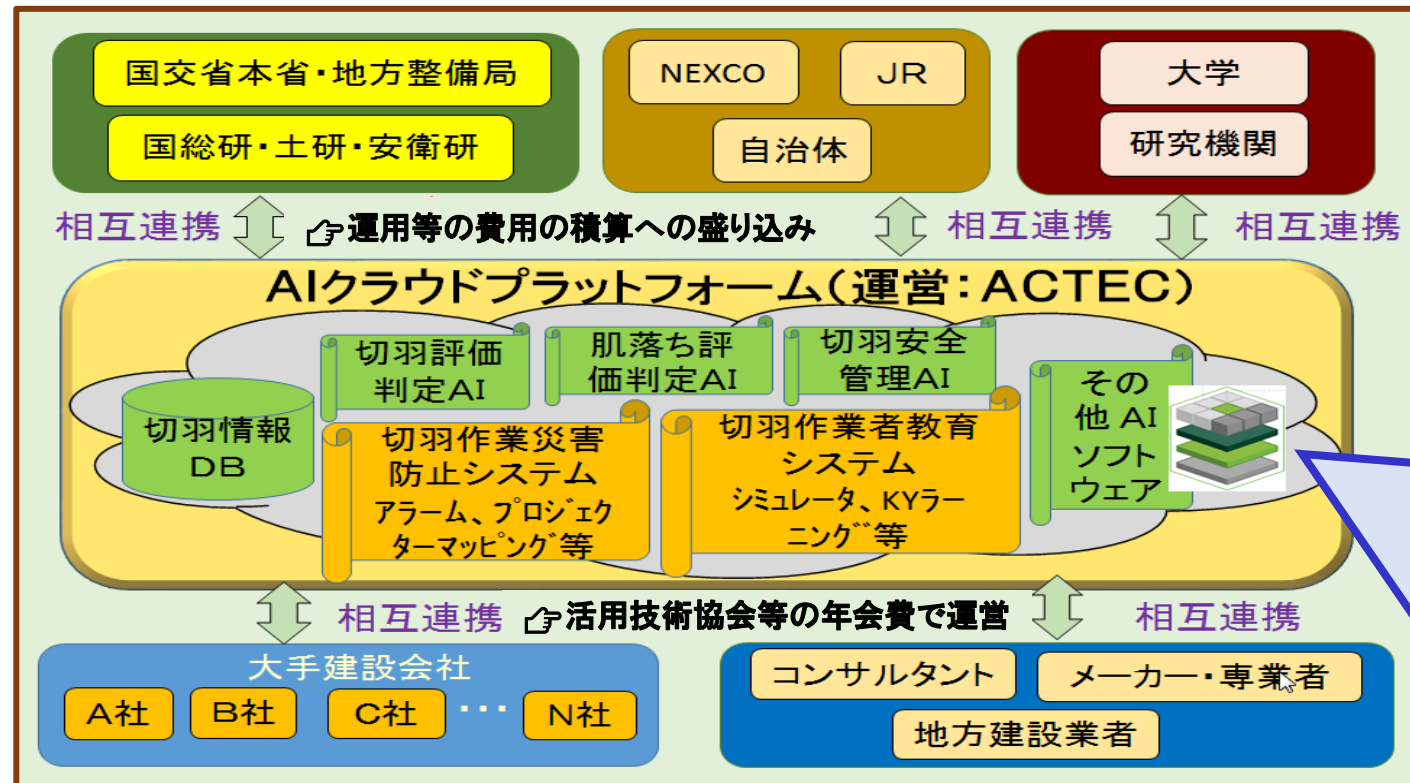
①切羽画像・切羽観察記録等切羽評価データ集計システム（近畿地整仕様）から試行・運用していく

②AIソフトは①の結果を踏まえて試行・運用していく 👉 発注者のご賛同・ご支援が不可欠

・関連データと評価・予測に関するアプリケーションをクラウドプラットフォーム上で運用して多くの関係者がいつでもどこでもそれらを使用できるシステムを展開する。

切羽評価データは、特に維持管理段階で活用

- ・ 地方整備局、大手建設業、地方の自治体・建設企業が活用、上流～下流の業務の効率化、同種災害防止
- ・ 多くデータを共有することで新たな技術開発を各社個別に実施可能



①当面（共同研究メンバー）
（一財）先端建設技術センター
保有高性能コンピューター
DGX-Stationによる運用（2021年度
下期から実施中）

②本格運用 ➡ 切羽評価データの
使用許可が不可欠
クラウドサービス（例えばMicrosoft
Azure等）を活用（2023年度以降）

③を含めて、発注者殿が検討

③国総研DXセンター
データプラットフォームと連携？（将来）

AIクラウドプラットフォーム運用イメージ

切羽画像等切羽評価データ集計システム、AIを活用した切羽評価及び肌落ち予測・支援の活用・展開のイメージ

※研究開発助成検査(令3元年度)資料抜粋・一部追記

- ## 【切羽評価データ集計システム】
- ・トンネル基本情報・切羽観察記録 ・切羽画像
 - ・変位計測記録etc
 - (施工業者⇨クラウド登録)

岩判定データ集計システム

経度 分 秒

岩石グループ	岩石名	切羽観察項目								
		A.切羽の状態		B.素掘面の状態		C.圧縮強度				
中硬質岩	安山岩	5	2	2	2	2	1	3	2	2
中硬質岩	安山岩	5	2	2	2	2	2	2	2	2
中硬質岩	安山岩	5	2	2	2	2	2	2	2	2
中硬質岩	安山岩	5	2	2	2	2	2	2	2	2

切羽観察表 [全岩質共通]

様式-1

1. 切羽観察情報

トンネル名: 筑後第1トンネル地下横野地区
 所在地: 福岡県筑後市
 切羽番号: No. 451 (11.9 m)
 切羽高さ: 11.9 m
 切羽幅員: 11.9 m
 切羽形状: 半円形
 切羽状態: 良好 (1/55 基準)

2. 切羽観察記録

評価区分	評価項目	評価結果	評価理由
1A	切羽の状態	2	2
1B	素掘面の状態	2	2
1C	圧縮強度	2	2

- ## 【AIを活用した切羽評価及び肌落ち予測・支援システム】
- ・教師データ
 - ・AIを活用した切羽評価ソフトウェア
 - ・AIを活用した肌落ち予測ソフトウェア

地質区分(切羽画像スケッチ)

風化変質

評価値	劣化	劣化	劣化
1	1%	1%	1%
2	5%	5%	5%
3	1%	1%	1%
結果	3	2	3

割れ目の頻度

評価値	劣化	劣化	劣化
1	0%	0%	1%
2	20%	7%	7%
3	80%	92%	92%
結果	3	3	3

課題と対応の例

- ①切羽画像の撮影方法や提出データ仕様等不統一
 - ⇨切羽画像方法の明確化と適用の義務付け
 - ⇨切羽観察記録の仕様※、集計フォーマット※の統一
 - ※共通仕様書の改定通達による業務内容明確化
- ②切羽評価情報等のデータが一括管理されていない
 - ⇨切羽評価データ集計システムへの入力義務付け※
 - ※データ入力、運用等の費用の積算制定

課題と対応の例

- ①教師データ作成及びソフトの改良の継続
 - ⇨以下のアップデートを活用技術協会等で実施
 - ・切羽評価データシステムに入力されたデータから教師データの作成、AI学習・ソフトウェアの最適化
 - ・肌落ち予測のソフトウェアの最適化
- ②運営費の継続的な確保
 - ⇨活用技術協会等による会費、工事使用料等
 - 「協会活動例:イメージ」
 - ・トンネルの維持管理における変状発生時の原因究明と対策のために点検データと連動して活用
 - ・トラブル・災害防止を含む施工シミュレータへ活用

3. 終わりに

AIを活用したトンネル切羽の地質評価並びに肌落ち予測の支援システムについては、先端建設技術センターでの勉強会、続く自主研究・共同研究、さらに、国土交通省建設技術研究開発助成の取組みで研究開発した結果、現場で運用できるレベルになった。また、幾つかのICTツールを山岳トンネルの現場で用いてその有効性や活用の可能性等について検証を実施してその結果を中間報告として取りまとめた。

これらの活用、実用化に向けては、以下のような課題をクリアする必要がある、国土交通省をはじめとする発注者、建設工事にかかわるコンサルタント、建設会社、専門者の皆様にご興味を持っていただくとともにより一層のご指導、ご支援を賜りたい。

- 山岳トンネルの切羽画像、切羽観察記録等のデータについては、国土交通省、NEXCOなどの発注機関ごとに統一された仕様での共有と継続的な蓄積（点検データ、土質柱状図等と同様に）
- AIを活用したトンネル切羽の地質評価並びに肌落ち予測支援システムについては、多くの産学官の関係者が参画して、継続的に活用できる仕組みと運用方法の検討及び運用

建設工事の関係各社は、競争としての生産性向上、業務の効率化に向けた努力は勿論必要である。

一方、共通するテーマについては、産学官の技術者が、業界全体の付加価値、安全性の向上を図るために一緒に議論・切磋琢磨して技術開発を行い、創意工夫による新たな技術を創生し、世の中に役立つ取組みも必要である。これらの活動が継続的かつ効率的に行える建設業界であり続けることが望まれ、弊センターはその一助となるべく引き続き研究開発を進めて参りたい。

産学官テーマ推進委員会委員 敬称略

所 属・役 職	氏 名
京都大学名誉教授（委員長）	大西有三
立命館大学総合科学技術研究所機構 上席研究員	小山幸則
東京工業大学名誉教授	寺野隆雄
東京都立大学教授	砂金伸治
（一社）日本建設機械施工協会施工 技術総合研究所 所長	真下英人
（一社）日本建設機械施工協会施工 技術総合研究所 研究第一部長	安井成豊
（国研）土木研究所道路技術研究 グループトンネルチーム上席研究員	日下敦

共同研究開発メンバー 敬称略
※退職、所属変更

所 属	氏 名
(一財)先端建設技術センター	藤森祥弘、吉川正 山本拓治、橋立健司 村井和彦※、木山智裕※ 杉本翔平※、近藤一寿 河原一弘
東洋大学	曾根真理※
(株)安藤・間	鈴木雅行※、鶴田亮介 辰巳順一
鹿島建設(株)	山本拓治※、宮嶋保幸 白鷺 卓
清水建設(株)	江戸川修一※、金岡幹※ 垣見康介、小島英郷 上岡真也
戸田建設(株)	高橋浩、杉山崇 辻川泰人
基礎地盤コンサルタンツ(株)	三木茂
(株)想画	田中統蔵
日本システムウエア(株)	野村貴律

参考資料 <令和元年度の研究開発成果の社外発表:土木学会>

- ①機械学習用切羽写真の現状と撮影方法の提案
- ②熟練工の肌落ちの気付き・知見・予測方法
- ③切羽観察・評価への赤外線サーモグラフィの活用

令和2年度学術年次講演会②

令和2年度学術年次講演会①

山岳トンネルにおける機械学習用切羽写真について —現状の写真と撮影環境および撮影方法の提案—

(一財) 先端建設技術センター 正会員	○木山 智裕	(株) 安藤・間	フェロー	鈴木 雅行
(一財) 先端建設技術センター 正会員	吉川 正	鹿島建設 (株)	フェロー	山本 拓治
(一財) 先端建設技術センター 正会員	橋立 健司	清水建設 (株)	正会員	小島 英郭
	東洋大学 正会員	曾根 真理	戸田建設 (株)	フェロー 高橋 浩

1. はじめに

近年、様々な業種において機械学習による省力化・高度化が進められており、山岳トンネルの分野でも機械学習による切羽評価システムの開発が進められている。しかし、多くの研究で教師データの少なさが問題となっている。本稿では山岳トンネル現場で機械学習に使用可能な切羽写真の画像データを収集するための撮影仕様を検討した結果を示す。

2. 切羽観察写真を機械学習写真に使用する際の課題

山岳トンネルの現場では、1日1回以上切羽観察が行われており、その際切羽観察写真が撮影されている。9現場から施工時の切羽観察写真を計3679枚入手し、現状撮影されている切羽観察写真を機械学習に使用する際の課題を抽出した。入手した切羽観察写真の例を写真-1に示す。その結果、次の5点が課題となった。1) 写真のコントラストや色調の変化、2) 切羽鏡面に焦点が合っていない、3) 手振れにより切羽が鮮明な画像になっていない、4) 写真の画素数が小さい、5) 影・黒板等の人工物が写り込んでいる。これらが発生する原因は次のような理由が考えられる。1) 同一現場であっても照明設備や撮影時の照明仕様が一定でないことあり、カメラのホワイトバランスを調整して撮影したため、コントラストや色調が変化してしまった。2) 黒板等の場所に焦点をあわせて撮影したため、切羽鏡面に焦点が合わなかった。3) シャッタースピードが遅くなり、手振れが発生した。4) 電子納品の基準にあわせてCALCモードで撮影した。5) 人工物がある状態で撮影した。このうち、5)を除く4つの課題について、切羽観察写真を機械学習写真に使用できる撮影仕様を検討した。

3. 撮影実験の実施

撮影仕様の検討にあたり、3現場において撮影実験を行った。撮影実験を行った各現場における切羽照明仕様を表-1に示す。撮影実験を行った3現場だけを見ても、各現場で切羽撮影時の照明仕様が大きく異なり、切羽鏡面の照度も70Lx~340Lxとバラツキが大きかった。今回の撮影実験では、各現場での色度の違いに対し、後から色補正を行うことができるよう、切羽に色度本(図-1参照)を設置して撮影を行った。また、撮影時に手振れ

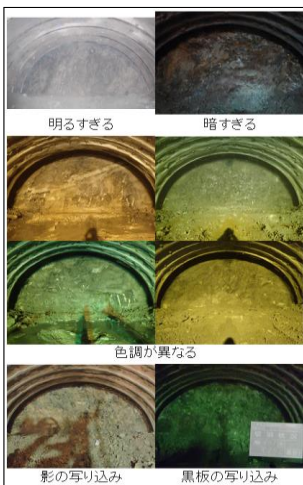


写真-1 現状の切羽観察写真の例

表-1 撮影実験時の切羽照明仕様

	現場イ	現場ロ	現場ハ
天端照明	—	○	2基ずつ (25m, 35m, 45m)
側壁照明	—	—	1基×2箇所 (15m)
ジャンボ照明	○	○	—
写真撮影用照明	○	—	—
切羽照度	70Lx	90Lx	340Lx

※(内)は切羽鏡面からの距離

キーワード 山岳トンネル, 切羽写真, 撮影要領(案), 機械学習, AI 解析

山岳トンネルにおける AI による肌落ち予測に向けた熟練作業員の知見について —肌落ちにおける熟練作業員の気付きと知見及びその予知方法—

(一財) 先端建設技術センター 正会員	○杉本 翔平	㈱安藤・間	フェロー	鈴木 雅行
(一財) 先端建設技術センター 正会員	村井 和彦	鹿島建設㈱	フェロー	山本 拓治
(一財) 先端建設技術センター 正会員	吉川 正	清水建設㈱	正会員	江戸川 修一
	東洋大学 正会員	曾根 真理	戸田建設㈱	フェロー 高橋 浩

1. はじめに

近年、建設分野では熟練作業員(坑夫等)が減少し、若手の入職も減少していることから人材確保が課題となっている。これらの課題解決の一策として、経験の浅い若手職員または作業員の判断・予測をAI技術を用いて支援することが有益である。しかし、判断や予測に必要な情報は、熟練作業員の知見や経験によって得られた情報に依存している部分が多いため、これらを機械学習で支援できるように関連づける必要がある。本稿では、山岳トンネルにおける肌落ち予測に着目しAI技術を用いた支援システムの構築を目的として、肌落ち予測に関する知見を熟練作業員にヒアリングを行い、得られた知見をセンシングする方法について考察した。

2. 熟練作業員へのヒアリングに至った経緯

山岳トンネルの現場では、現在、各工事発注者の切羽観察評価をもとに、現場での目視及び切羽画像から切羽の状態を判断している。しかしながら、これらの判断には、切羽画像から得られる情報以外に熟練作業員の知見や経験が含まれている。AI技術などで肌落ち予測の判断を支援する場合、熟練作業員の知見や感覚をシステムに組み込む必要がある。そのために、次の2点の課題がある。①肌落ち発生の予兆を判断する際、熟練作業員の着目点は経験的あるいは感覚的に各々が個別に持っていること、②熟練作業員が肌落ち発生の予兆を判断する要素を知識として結び付ける必要がある。以上の2点の検討を行うため、現場に従事している熟練作業員にヒアリングを行い、情報をセンシングする技術との対応について検討を行った。検討フローを図-1に示す。

3. 熟練作業員へのヒアリングについて

肌落ち発生の予兆を判断する切羽の現象を把握するため、3現場において熟練作業員にヒアリングを行い計15名にヒアリングを実施した。ヒアリング対象者の情報を表-1に示す。ヒアリングの質問事項はトンネル掘削時から支保工施工完了時までとし、各作業項目及び自然現象に分類したものに代えて、ヒアリング対象者の過去の肌落ち発生時の現象やその時感じた予兆などを質問した。その結果、作業段階ごとに判断要素が多くあり、湧水または岩質といった視覚的情報、音などの聴覚的情報など、熟練作業員は五感を働かせて切羽の状況を把握していることが分かった。これに基づき、その回答が地盤工學上の現象とどのような関係が存在するかを検討した。ヒアリング結果と検討結果を表-2に示す。

キーワード 山岳トンネル, 機械学習, 肌落ち, AI 技術
連絡先 〒112-0012 東京都文京区大塚 2-15-6 (一財) 先端建設技術センター TEL03-3942-3991

令和2年度学術年次講演会③

山岳トンネルの切羽観察・評価に向けた赤外線サーモグラフィの活用について —発破・こそく・吹付けコンクリートの各段階の切羽面や漏水等の温度測定例—

(一財) 先端建設技術センター 正会員	○吉川 正	㈱安藤・間	フェロー	鈴木 雅行
(一財) 先端建設技術センター 正会員	橋立 健司	鹿島建設㈱	フェロー	山本 拓治
(一財) 先端建設技術センター 正会員	木山 智裕	清水建設㈱	正会員	江戸川 修一
	東洋大学 正会員	曾根 真理	戸田建設㈱	フェロー 高橋 浩

1. はじめに

山岳トンネル工事における切羽では、発破、こそく、鏡吹付けコンクリート(以後、鏡吹付けと称する)等の作業中に、発破、鏡吹付け、湧水・漏水、換気等により各部位で温度差や経時変化が生じている。一方、支保パターンを決める切羽観察の評価項目の一つに湧水と水による劣化があるが、例えば前者の区分は、定性的な5段階の(1. なし・滲水程度, 2. 滴水程度, 3. 集中湧水, 4. 全面湧水, 5. その他)となっており、その評価は、個々人の判断に委ねられている。今回、2現場において、赤外線サーモグラフィ(使用カメラFLIR C2)による各施工段階(発破、こそく、鏡吹付け)の切羽及び施工後日数の経過した天井や側面の二次吹付けコンクリート(以後、二次吹付けと称する)の漏水部分の温度測定を実施して、諸現象との関連付けを試みた。

2. 山岳トンネルの切羽等の各部位に対する温度測定結果

(1) 発破掘削方式による各作業段階の切羽

N現場の発破、こそく、鏡吹付け施工後の切羽の写真と温度測定の結果から得られた知見を以下に示す。

1) 発破後

写真-1、2及び表-1より、切羽面の地山部は、デジタル写真(RGB)と比較して赤外線画像では、孔尻(発破位置)部分の温度が周辺より高温の橙色で円状に明確に写っている。

図-1の発破計画図と比較することで、穿孔精度の確認が可能となる。ずりについては、紫色の温度が低い部分と切羽から離れた部分(写真手前部)に孔尻程度の温度領域(橙色)が見られ、発破ずりの飛散状況・範囲の推定にも活用可能と考える。

2) こそく後

写真-3及び表-2より、地山については、発破で残った部分をブレーカで撤去することで、奥の高温部が表面に出てきて、地山全体がほぼ均質に18~20℃程度の橙色の部分広がっている。下部は、ずりの撤去で孔尻が気中に見えてきている(橙色の円形部)。発破後に20℃前後であったずりは、坑内換気に触れて全体的に冷えてきている。

3) 鏡吹付け施工後

写真-4、5、表-3は、鏡吹付け施工後の切羽写真と温度分布である。鏡吹付けの配合は、表-4であり、設計厚さは、30mm、練り混ぜ温度は19℃、リバウンド率は、天端・側壁部平均: 9.0%(2019年12月26日試験値)である。鏡吹付けは、21℃程度の高温域(橙色)と18℃程度の低温域(薄紫色)が混在している。吹付け厚が薄く、こそく後の切羽温度に依存している可能性がある。発破で生じたずり部は、19℃程度の高温域と16℃程度の低温域が混在しており、高温域には、リバウンドした吹付けコンクリートが混在している可能性が考えられる。

キーワード 赤外線, サーモグラフィ, 切羽写真, 切羽画像, 温度分布, 漏水, 吹付け, 発破, ずり, リバウンド
連絡先 〒112-0012 東京都文京区大塚 2丁目15番6号 (一財) 先端建設技術センター TEL03-3942-3991

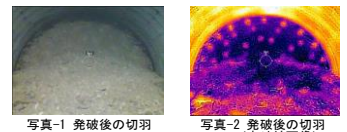


表-1 発破後の切羽温度測定結果

測定対象	温度℃		
切羽(地山)	14.1	14.0	13.9
切羽(孔尻)	20.5	18.1	18.0
ずり(高温部)	22.1	19.3	17.2
ずり(低温部)	16.1	14.0	13.8

測定日時: 2020. 1. 17 8: 29



表-2 こそく後の切羽温度測定結果

測定対象	温度℃		
切羽(地山:薄紫色)	18.5	18.3	17.9
切羽(孔尻:橙色)	20.0	19.0	18.9
ずり(高温部:橙色)	16.0	16.0	15.9
ずり(低温部:紫色)	14.7	14.5	14.3

測定日時: 2020. 1. 17 9: 52



表-3 鏡吹付け後の温度測定結果

測定対象	温度℃		
二次吹付け(施工済み:薄紫色)	27.5	27.1	26.2
鏡吹付け(高温部:橙色)	21.8	21.3	20.9
鏡吹付け(低温部:薄紫色)	18.1	17.8	17.3

参考資料 <令和2年度の研究開発成果の社外発表：土木学会>

①AIを活用したトンネル切羽の地質評価と肌落ち予測支援による災害防止に関する研究開発①

－研究開発項目と実施概要－

②同② 一切羽の画像撮影方法の最適化について

③同③ 色見本を用いた色補正プログラム

④同④ AIを活用した切羽地質評価支援システムのプロトタイプについて

令和3年度学術年次講演会①

AIを活用したトンネル切羽の地質評価と肌落ち予測支援による災害防止に関する研究開発①

－研究開発項目と実施概要－

(一財)先端建設技術センター	正会員	○吉川 正	清水建設㈱	正会員	金岡 幹
(一財)先端建設技術センター	フェロー	山本 拓治	戸田建設㈱	正会員	高橋 保幸
東洋大学	正会員	曾根 真理	基礎地盤コンサルタンツ㈱	正会員	三木 茂
東洋大学	フェロー	鈴木 雅行	南徳園	正会員	田中 統哉
鹿島建設㈱	正会員	宮嶋 保幸	日本システムウェア㈱	正会員	野村 貴博

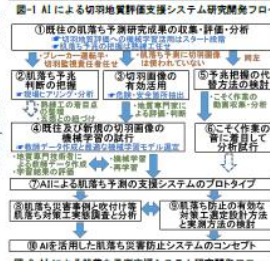
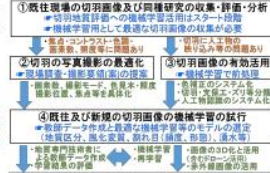
1. はじめに

トンネル切羽の地質評価や肌落ち発生状況の判断については、熟練者や経験豊富な専門技術者による切羽の目視観察や切羽状況の把握など、多くが従来の経験や勘に頼ってきた。本研究開発は、画像、撮影機器等のデータについて、ICTの活用による迅速な取得・伝送・処理、仕様の共通化による有効活用、機械学習(ニューラルネットワーク等)による迅速な現象の把握と評価を行うものである。その結果、未熟者によるトンネル切羽の地質評価、肌落ち予測、最適な肌落ち防止対策の計画・実施の支援を可能とするものである。

2. 研究開発項目と成果の概要

研究開発対象は、切羽地質評価と肌落ち予測である。それぞれに対してAIを活用するための研究開発の主な項目と実施のフローを図-1, 2に、その実施結果の概要を以下に示す。

- (1) AIを活用したトンネル切羽の地質評価の支援
① 既現場の切羽画像及び同種研究の収集・評価・分析
先ず、施工済み現場の切羽画像を収集して、評価・分析した結果、ピンボケ、色調・コントラストのバラツキ、画素数や照度の不足、切羽が影や黒板で隠れる等、AIによる評価に対して、適していない画像が多々あることが分かった¹⁾。
- 2) 切羽画像の撮影の最適化
AI活用による切羽地質評価支援用の切羽画像撮影方法の最適化に向け、現場で調査・試験(図-3)を実施して切羽画像撮影実験(案)を構築¹⁾した。
- 3) 切羽画像の有効活用
色見本を用いた切羽画像の色補正システムや切羽画像から切羽や支保工等の抽出、影、黒板、鉄ボルト等の人工物を認識するシステムを構築し、不適切な画像の有効活用に取り組んだ。赤みがかかった切羽画像に対する白黒色見本のRGB値による補正例を図-4に、切羽、支保工等の抽出並びに人工物のラベリングのシステムイメージを図-5に示す。
- 4) 既及び新規の切羽画像の機械学習の試行
発生用切羽判定表の作成に必要な項目から、先ず、地質区分、風化区分、割れ目の程度について、機械学習等を活用して図-6のように、図表の作成、点数化を図った。



キーワード トンネル、切羽画像、教師データ、機械学習、肌落ち災害防止、AI
連絡先 〒112-0012 東京都文京区大塚2丁目15番6号 (一財)先端建設技術センター TEL03-3942-3991

令和3年度学術年次講演会②

AIを活用したトンネル切羽の地質評価と肌落ち予測支援による災害防止に関する研究開発②

－切羽の画像撮影方法の最適化について－

先端建設技術センター	正会員	○橋立 健司	(株)安藤・間	正会員	辰巳 順一
先端建設技術センター	正会員	吉川 正	鹿島建設(株)	正会員	宮嶋 保幸
先端建設技術センター	フェロー	山本 拓治	清水建設(株)	正会員	上岡 真也
東洋大学	正会員	曾根 真理	戸田建設(株)	正会員	辻川 泰人
(株)想画	正会員	田中 統哉	日本システムウェア(株)	正会員	野村 貴博

1.

山岳トンネルにおける機械学習用切羽画像の課題抽出とこれを改善するための撮影方法の提案
本報告は、山岳トンネル現場において提案した切羽写真撮影要領(案)にしたがった撮影を行い、得られた改善点を反映し、AI活用に向けた撮影環境・最適化について提案を行うものである。

- ① 画像のトビや色調の変化、② 切羽鏡面に焦点が合っていない、③ 不明瞭な画像、④ 画像の画素数が小さく機械学習に不向き、⑤ 影や黒板等の人工物が入っている等が挙げられ対策として、①色見本と一緒に撮影する、②切羽鏡面をわけて撮影する、③三脚を使用して手振れを防止、④の画素数を1200万画素以上とする、⑤については別途していた。



キーワード トンネル、切羽画像、撮影環境・方法、機械学習、AI 解析
F112-0012 東京都文京区大塚2-15-6 (一財)先端建設技術センター TEL E.03-3942-3991

令和3年度学術年次講演会③

山岳トンネルの切羽観察・評価に向けた画像の色補正について

－色見本を用いた色補正プログラム－

先端建設技術センター	正会員	○田中 統哉	西安藤・間	正会員	辰巳 順一
先端建設技術センター	正会員	吉川 正	鹿島建設㈱	正会員	宮嶋 保幸
先端建設技術センター	フェロー	山本 拓治	清水建設㈱	正会員	小島 英輝
先端建設技術センター	正会員	橋立 健司	戸田建設㈱	正会員	杉山 泰輝
東洋大学	正会員	曾根 真理	日本システムウェア㈱	正会員	野村 貴博

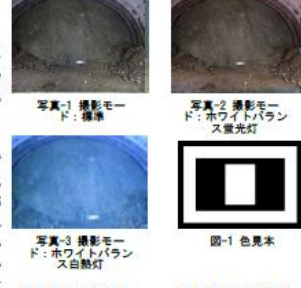
における切羽を撮影した画像からは、割れ目の程度、風化変質、地質区分等の分析、肌落ちもできる。風化変質や地質区分等の分析には切羽の色合いが重要な情報となるが、撮影に用いたカメラの性質、坑内照明等の環境要因によって、撮影された画像の色合いは変化する。撮影現場にされない場合、色合いを基準とした分析は現場ごとに閾値の変更を要するという課題が生じ、予め色情報を定義した色見本を作成し、切羽撮影時に色見本を含めた画像を撮ること色合いの変化を補正することを試みた。

正結果

- ① 色合い変化
現場においてカメラの撮影モードを変え、これらは色合い変化が顕著な例ではあ照明が自然光を用いていれば全体が暖色いれば全体が寒色の色合いに変化する、色見本

表-1, 2に示す色情報で作成した色見本で切羽の前方に配置し撮影することで、色見が得られる。色見本は表-1のように黒部senとも階級値は0であるところ、得られより色合いが変化するため、暖色に色合いればRedの階級値が20に引き上げるといの場合、画像全体のRedの階級値を引き下あるBlue, Greenの階級値を引き上げる画、本来の階級分布に補正され、撮影環境に減できる。

分類
色を検出する手法としては、元画像(写真行)ことで階級値を強調(写真-5)し、グ真-6)した階級値を最小110~最大253の-7)することで外周の白枠を検出する。ノ途切れた線分を結合する膨張処理をかけ、られた輪郭のうち、面積が5000ピクセル輪郭の凸包及び近似処理を行い、四角形本と指定している。検出に用いた閾値等のた複数の写真を元に適合する数値を求め縮小に条件の異なる現場に対しては閾値がある。



色	Red	Blue	Green
黒	0	0	0
白	255	255	255

色	Cyan	Magenta	Yellow	Black
黒	93	88	89	80
白	0	0	0	0

令和3年度学術年次講演会④

AIを活用したトンネル切羽の地質評価と肌落ち予測支援による災害防止に関する研究開発④

－AIを活用した切羽地質評価支援システムのプロトタイプについて－

先端建設技術センター	正会員	○野村 貴博	(一財)先端建設技術センター	正会員	吉川 正
先端建設技術センター	フェロー	山本 拓治	(一財)先端建設技術センター	正会員	村井 和彦
先端建設技術センター	フェロー	鈴木 雅行	鹿島建設㈱	正会員	宮嶋 保幸
先端建設技術センター	正会員	小島 英輝	戸田建設㈱	フェロー	高橋 浩
先端建設技術センター	正会員	曾根 真理	基礎地盤コンサルタンツ㈱	正会員	三木 茂

技術と画像処理技術を用いる山岳トンネル切羽評価と地質評価の支援システムのプロトタイプ開発に関する。本稿では、一連の検討を踏まえた地質評価の支援システムのプロトタイプ開発に関する。

切羽画像よりAI技術を用いて表-1に示す切羽評価項目を自動で算出するシステムである。現在の、の板度、割れ目の形態についてのプロトタイプは、り、順次評価項目を増やしている。また、地質作成システムの構築にも取り組んでいる。(地質スケッチ)の評価

評価は、教師なし学習であるIIC²⁾(Invariant IIC)を使用している。IICのアルゴリズムで、のペアとなる画像から相互情報量を最大化するクラス分類している。クラス分類数は事前にバラことで数を制限することができ、25に設定し

色の境界や割れ目等の鋭角な特徴をクラス分類することある。表-2は地質専門家が解析結果を評価したもので部分的に70%以上を達成している。図-2

度を示す。界についてある。

度は評価は、Canny法によりエッジ検出し、その結果を度と相関させる線形回帰による手法を採用した。Canny法とは画像のノイズ削減・輝度勾値の抑制を行うことでエッジ検出を行う手法である。今回は切羽上の割れ目のある箇所を短

キーワード トンネル、AI、切羽画像、深層学習、画像分類手法
〒112-0012 東京都文京区大塚2丁目15番6号 (一財)先端建設技術センター TEL03-3942-3991

項目	評価	備考
色調	◎	
コントラスト	◎	
ピンボケ	◎	
影	◎	
黒板	◎	
鉄ボルト	◎	
割れ目	◎	
風化	◎	
地質	◎	
肌落ち	◎	
その他	◎	

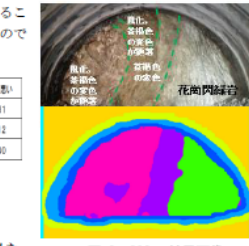
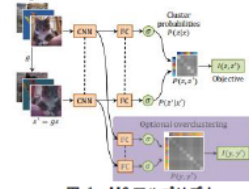


図-2 IICの結果画像



ご清聴有難うございました