

テーマ: 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

研究開発実施体制(9者、延べ21名)

(一財)先端建設技術センター(研究代表者1名、研究分担者7名)

東洋大学(株)(研究分担者1名)、安藤・間(同1名)、鹿島建設(株)(同2名)

清水建設(株)(同3名)、戸田建設(株)(同3名)、基礎地盤コンサルタンツ(株)

(同1名)、(株)想画(同1名)、日本システムウエア(株)(同1名)

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)AI及び汎用機器類を活用した肌落ち災害防止システム

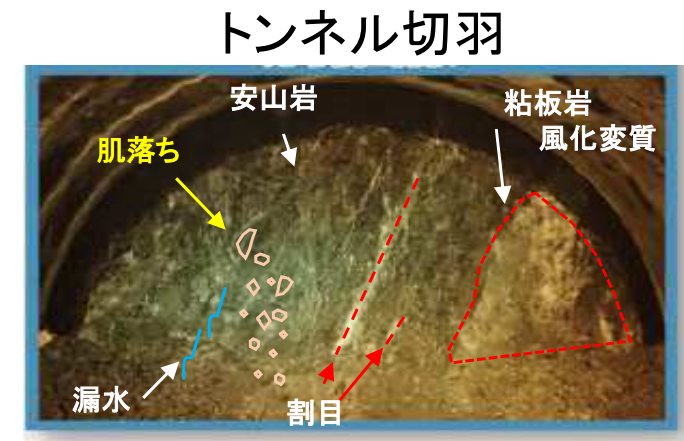
発表者

研究代表者 (一財) 先端建設技術センター 吉川 正

1. はじめに 「現状」

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・漏水・圧縮強度

「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

AIを活用した切羽評価・肌落ち予測支援

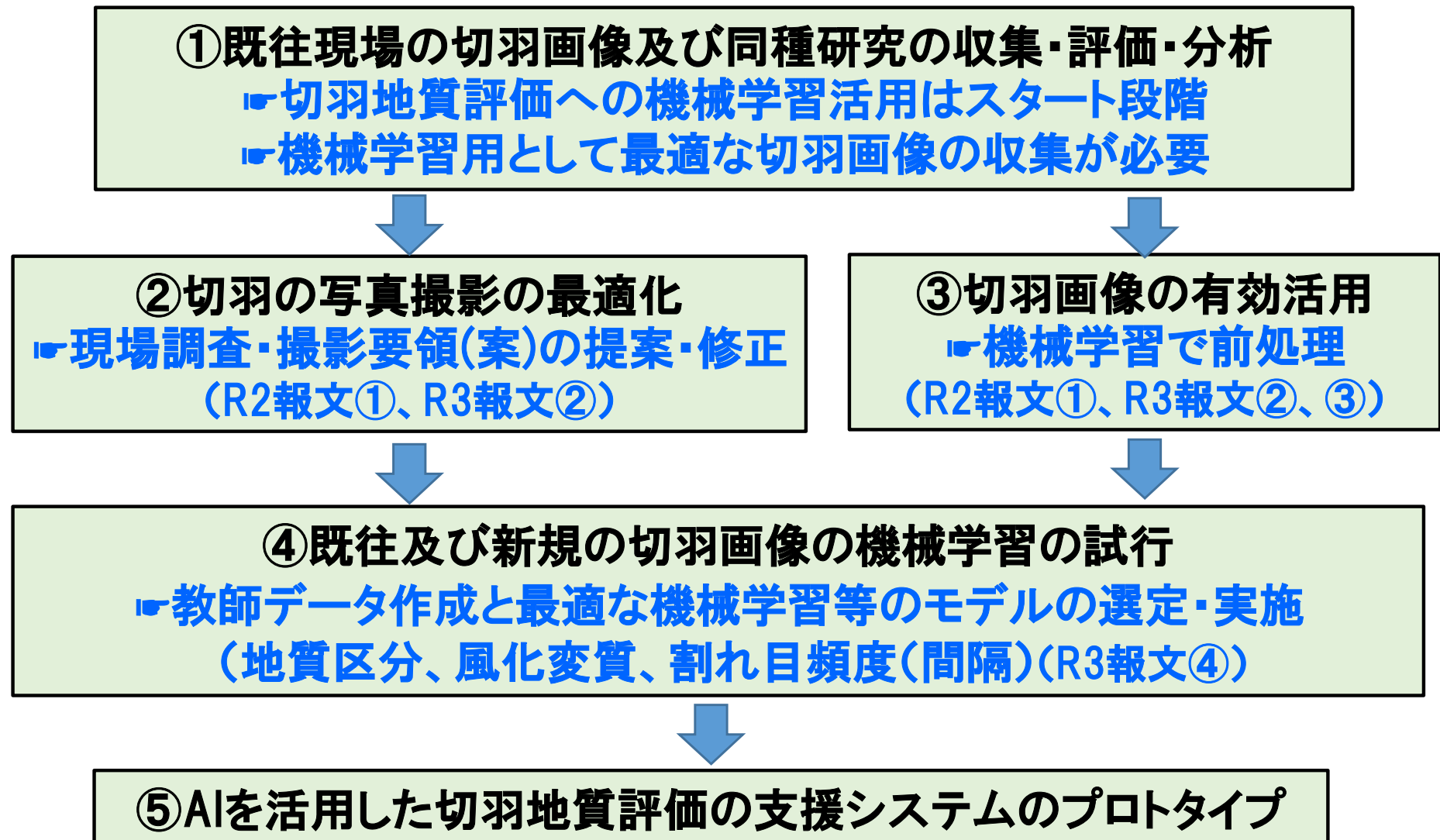
- 未熟練者によるトンネル切羽の地質評価，肌落ち予測，最適な肌落ち防止対策の計画・実施の支援

令和元年及び令和2年：国土交通省建設技術研究開発助成

平成30年度～令和3年度：(一財)先端建設技術センター自主研究

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(R3報文①)



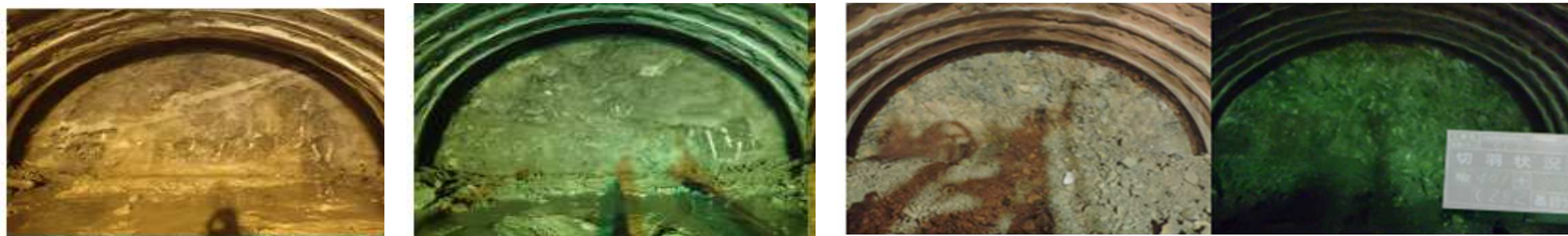
※R2報文、R3報文は、土木学会全国大会学術年次講演会のそれぞれ令和2年度、令和3年度の発表報文を示す。○番号は、PPTの最後に添付の参考シート参照

(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 (R1 報文①)

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、黑板・影入り等

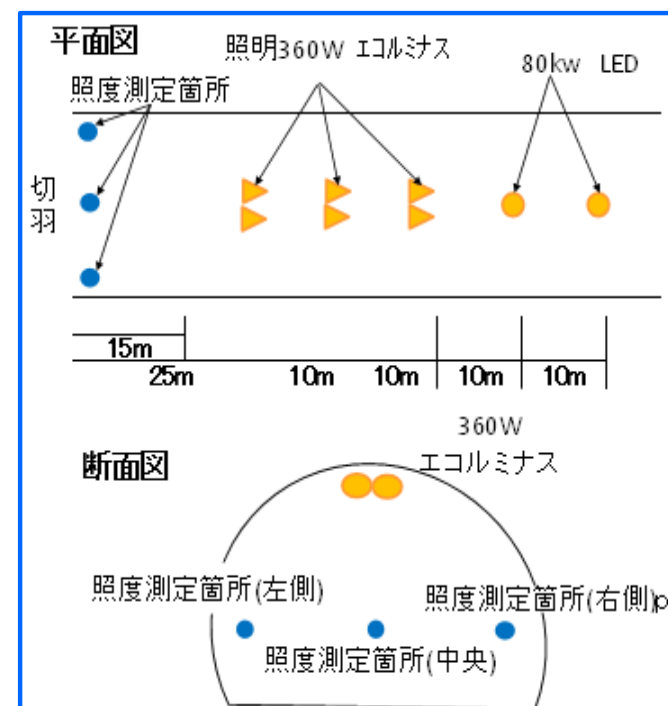


不適切な既往現場の切羽画像の例

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っている。
- 照度は70~200Lxとばらついている。

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



②切羽の写真撮影の最適化(R1報文①、R2報文②)

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。

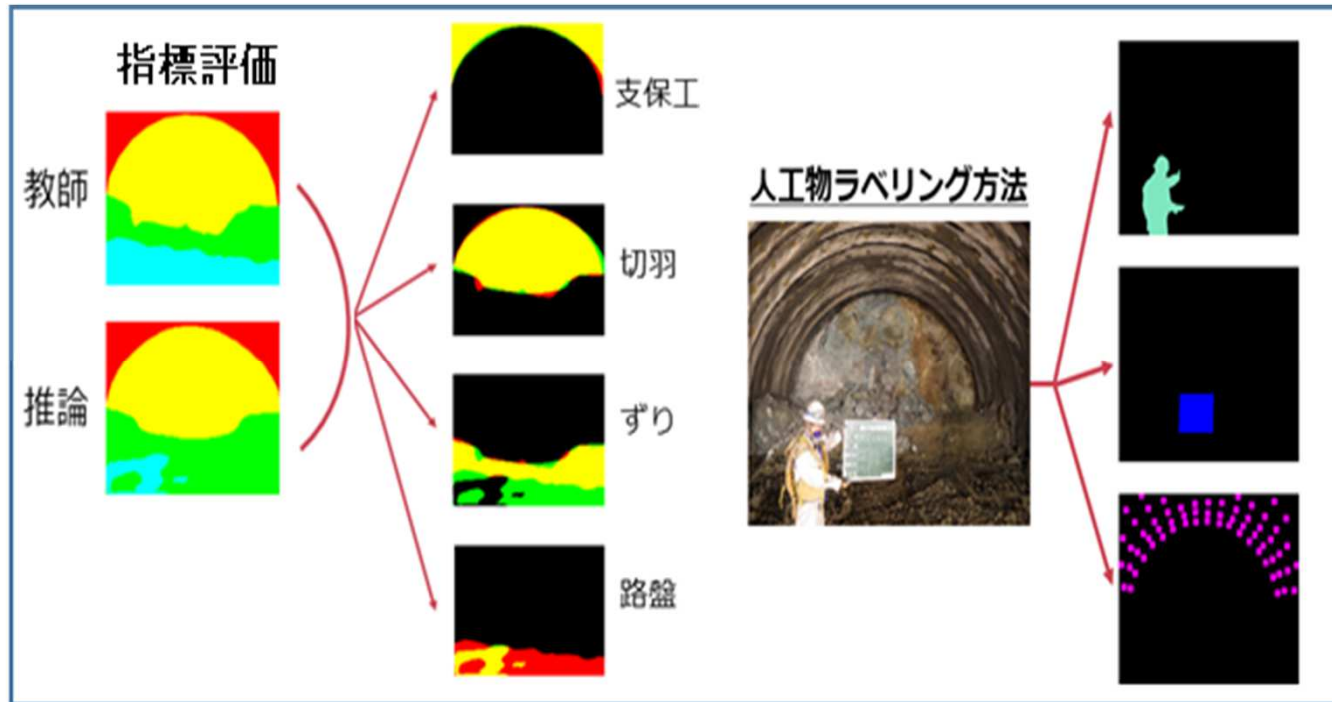
「撮影時の留意点」

- 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。
- 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(R3報文③)

機械学習で前処理

切羽画像から切羽、支保工等の抽出、影、黒板、鏡ボルト等の人工物を認識するシステムや色見本を用いた切羽画像の色補正システムを構築した。

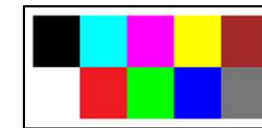


研究開発タイプ①



③最終：白黒

研究開発タイプ②



色見本の最適化



(黒:0,0,0、白:255,255,255)
の変化を補正

RGB値補正イメージ

切羽、支保工等区分及び人工物ラベリングのイメージ

④ 既往及び新規の切羽画像の機械学習の試行(R3報文④)

- 教師データ作成と最適な機械学習等のモデルの選定・実施
(地質区分、風化変質、割れ目の頻度(間隔))

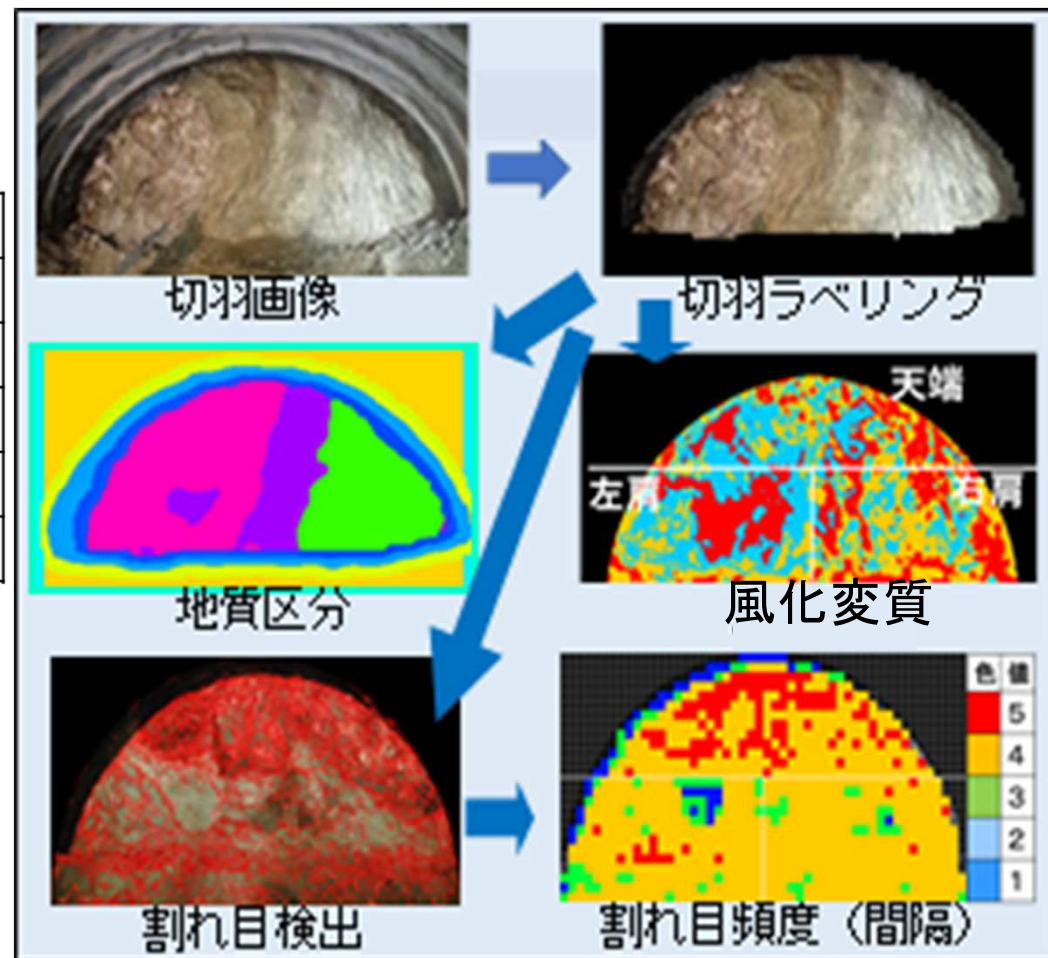
発注者用の切羽判定表の作成に必要な項目の中から、地質区分、風化区分、割れ目の頻度について、**機械学習等を活用して、図面化、点数化を図った**

(報文④で報告)。

評価対象項目別の使用モデル
と教師データの有無

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
地質変質	IIC	無
風化区分	K-means	無
割れ目頻度(間隔)	Canny法	有

- 残りの項目については、(一財)先端建設技術センターの令和3年度自主研究で実施している。
(湧水については、赤外線画像の適用の可能性(R2報文③)、走行傾斜について3枚の切羽画像による3D画像の活用等)



評価対象項目別の出力例

7

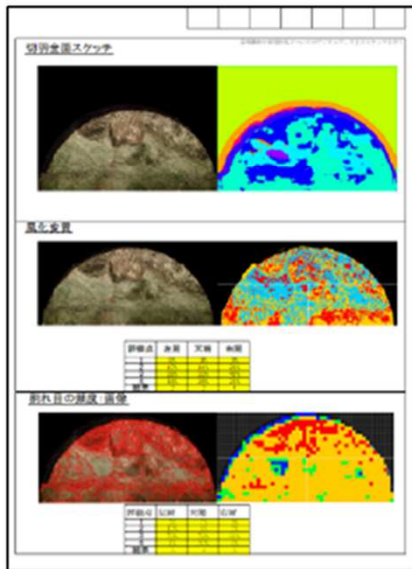
⑤ AIを活用した切羽地質評価の支援システムのプロトタイプ

現場技術者は、現場で切羽を観察しながら、タブレット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。

切羽判定表



出力結果



地質区分

風化変質

割れ目
頻度



2. 切羽判定表〔切羽観察表及び切羽評価表〕の様式
様式-1

切羽観察表〔全岩質共通〕

1. 切羽基礎情報

トンネル名	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		
観察年月日	年	月	日
地点	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		
切羽番号(切羽ID)	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		
切羽からの距離	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		
止端位置	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		
地質地層	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX		
地層名	地層時代	区分	地層の記号
含水状況	(R) 湿り 〇 (R) 乾き 〇 (R) 乾き 〇 (R) 乾き 〇 (R) 乾き 〇	備考欄	(切羽番号) (調査日) 〇 (R) (R) (R) (R)

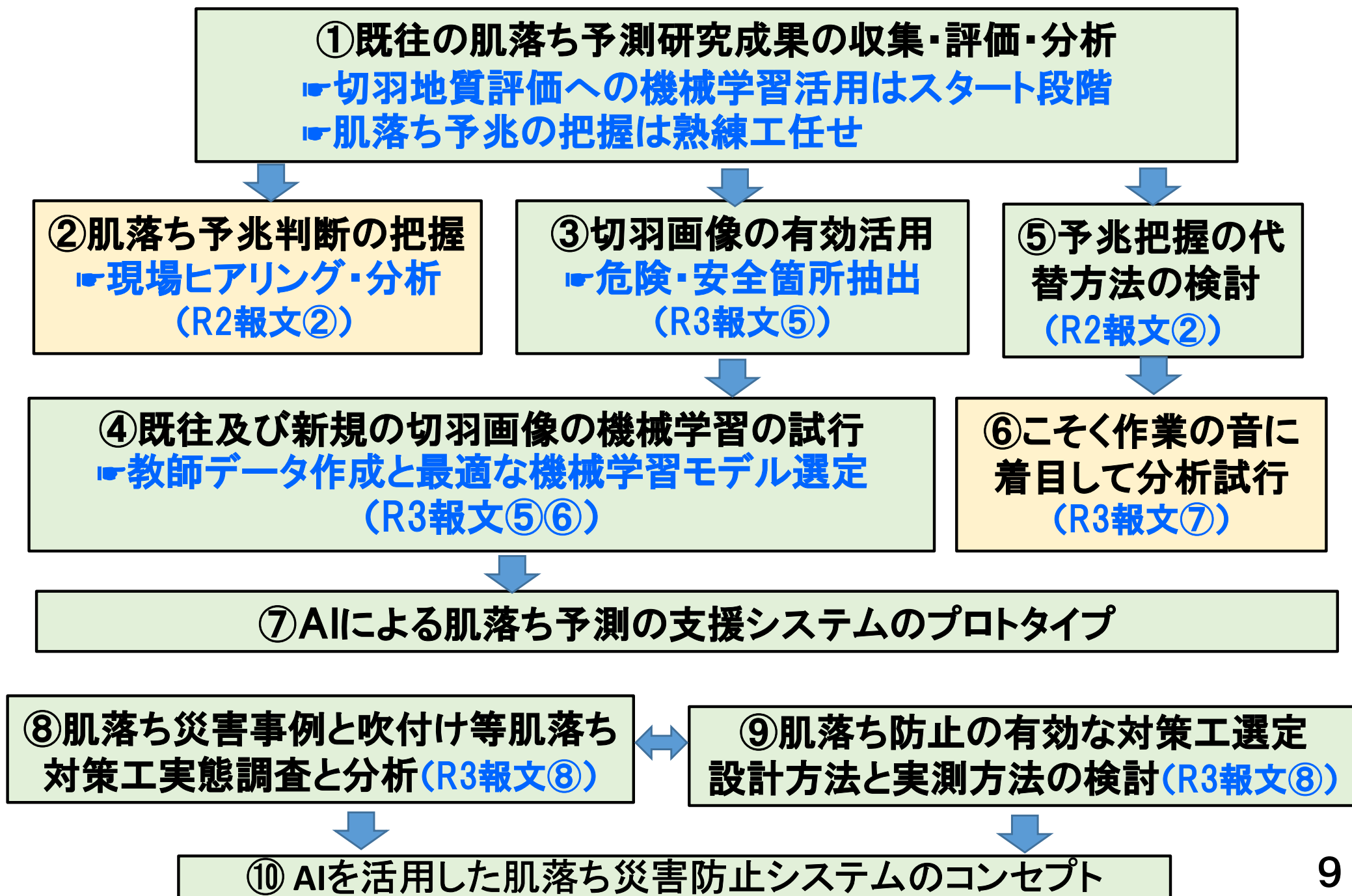
2. 切羽観察記録

観察項目	観察内容	観察結果	観察結果	観察結果	観察結果	評価区分
(A) 切羽の性状	1. 観察から観察が得られる	2. 観察の押し出し	3. 観察面が崩壊する	4. 観察面が崩壊する	5. その他	
(B) 崩壊の性状	1. 崩壊の性状	2. 崩壊の性状	3. 崩壊の性状	4. 崩壊の性状	5. その他	
(C) 崩壊の性状	1. 崩壊の性状	2. 崩壊の性状	3. 崩壊の性状	4. 崩壊の性状	5. その他	
(D) 崩壊の性状	1. 崩壊の性状	2. 崩壊の性状	3. 崩壊の性状	4. 崩壊の性状	5. その他	3 3 4
(E) 崩壊の性状	1. 崩壊の性状	2. 崩壊の性状	3. 崩壊の性状	4. 崩壊の性状	5. その他	3 4 3
(F) 崩壊の性状	1. 崩壊の性状	2. 崩壊の性状	3. 崩壊の性状	4. 崩壊の性状	5. その他	
(G) 崩壊の性状	1. 崩壊の性状	2. 崩壊の性状	3. 崩壊の性状	4. 崩壊の性状	5. その他	
(H) 崩壊の性状	1. 崩壊の性状	2. 崩壊の性状	3. 崩壊の性状	4. 崩壊の性状	5. その他	
(I) 崩壊の性状	1. 崩壊の性状	2. 崩壊の性状	3. 崩壊の性状	4. 崩壊の性状	5. その他	

他

観察項目	観察内容	観察結果	観察結果	観察結果	観察結果	観察結果	評価区分
崩壊の性状	1. 崩壊の性状	2. 崩壊の性状	3. 崩壊の性状	4. 崩壊の性状	5. その他		
崩壊の性状	1. 崩壊の性状	2. 崩壊の性状	3. 崩壊の性状	4. 崩壊の性状	5. その他		
崩壊の性状	1. 崩壊の性状	2. 崩壊の性状	3. 崩壊の性状	4. 崩壊の性状	5. その他		
崩壊の性状	1. 崩壊の性状	2. 崩壊の性状	3. 崩壊の性状	4. 崩壊の性状	5. その他		
崩壊の性状	1. 崩壊の性状	2. 崩壊の性状	3. 崩壊の性状	4. 崩壊の性状	5. その他		

2) AIによる肌落ち予測支援システム研究開発フロー(R3報文①)



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

↳切羽地質評価への機械学習活用はスタート段階

・肌落ち予測に切羽画像は使われてない。

②肌落ち予兆判断の把握(R2報文②) ⑤予兆把握の代替方法の検討(R2報文②)

↳現場ヒアリング・分析（令和元年度に実施、令和2年度は中止）

↳肌落ち予兆の把握は熟練工任せ

熟練工へのヒアリングと着目点の整理・五感との紐づけ

3現場 15名の熟練工

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

⑥こそく作業の音に着目して分析試行
(R3報文⑦)

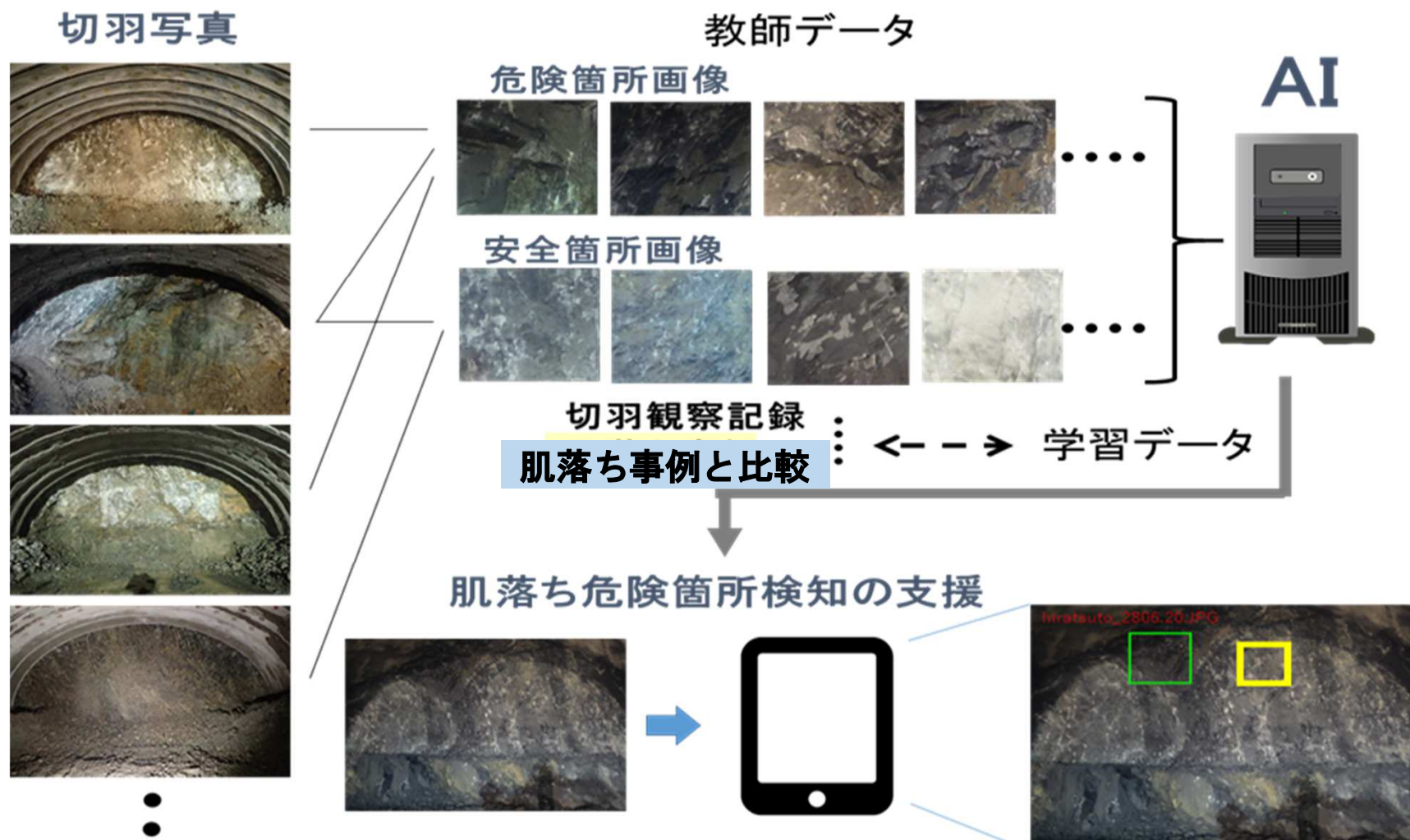
工種	No	熟練作業員の五感						地盤工学上の現象		
		ヒアリング結果(熟練作業員の着目点)	視	聴	触	嗅	味		他	
こそく作業時	1	石の落ち方	○					○	肌落ち・切羽崩落の予兆	
	2	亀裂の目	○						同左による切羽鏡面崩壊(すべり)	
	3	岩の割れ方	○						肌落ち・切羽崩落の予兆	
	4	バラバラと不安定で止まらない	○					○	肌落ち・切羽崩落の予兆	
	5	ボソボソとしている	○		○			○	浮き石の存在, 周辺地山の緩み, 肌落ち・切羽崩落予兆	
	6	ブレーカーの音			○			○	浮石の存在, 岩質の硬軟の混在	
	7	ブレーカーのノ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	
切羽観察時	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・切羽崩落予兆, 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	
穿孔および装薬時	17	吹付がつかない	○						地山強度低下, 湧水, 均等係数低下(砂質土)	
	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	
	その他	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

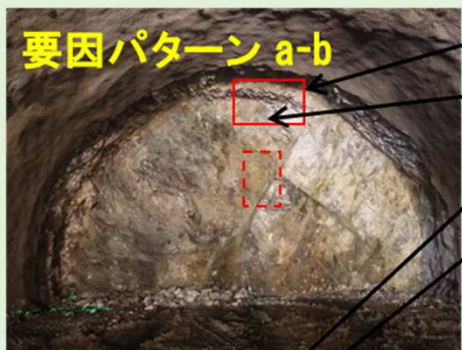
③切羽画像の有効活用

▣危険・安全箇所抽出(R3報文⑤)

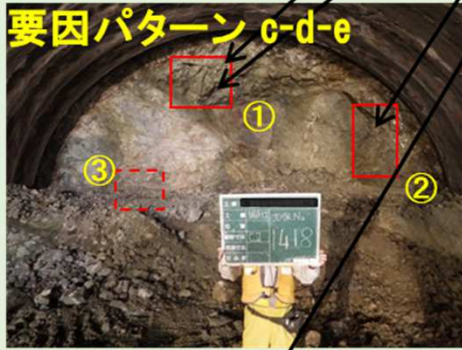
- 地質の専門技術者が切羽画像から肌落ち危険箇所と安全箇所の教師データを抽出
- 教師データと実際の肌落ち事例とを比較して、教師データそのものの妥当性を検証



・地質の専門家による教師データ抽出着目点(R3報文⑤)



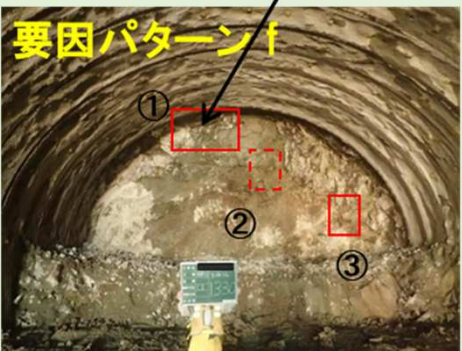
- a: 肌落ち箇所がトンネル外周部に位置する
- b: 割れ目に沿って岩塊の抜け落ち跡あり
- c: 割れ目に沿って切羽面が凸凹している
- d: 割れ目細かく入る
- e: 周囲より変色, 風化, 変色風化が著しい
- f: 滲水, 湧水あり



④ 既往及び新規の切羽画像の機械学習の試行

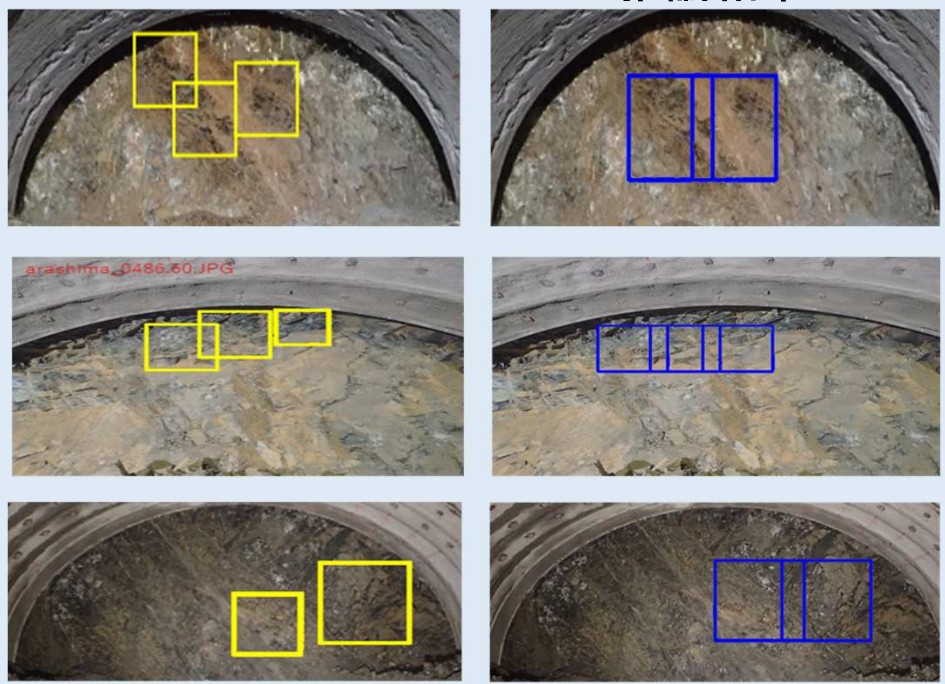
▣ 教師データ作成と最適な機械学習モデル選定(R3報文⑥)

システムが示す予測領域は、地質の専門家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。



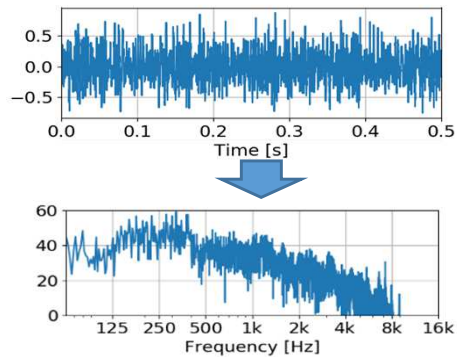
専門家によるラベリング

推論結果

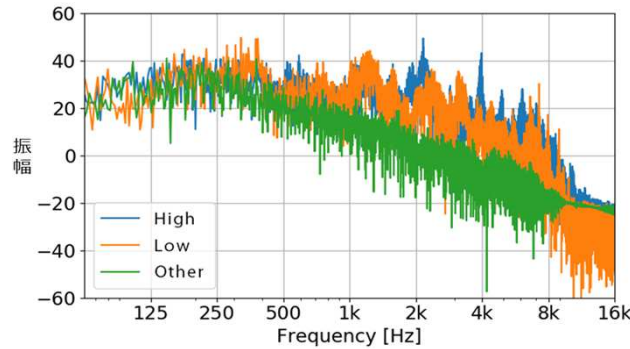


肌落ち推定結果の例

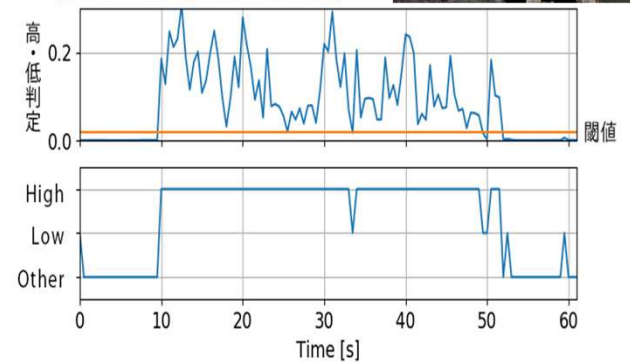
⑥こそく作業の音に着目して分析試行(R3報文⑦) ブレイカー作業の音に着目して分析試行 周波数への変換による学習 (試行例)



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

⑦AIによる肌落ち予測の支援システムのプロトタイプ

肌落ち危険箇所の予測結果と背面カメラによる切羽画像をタブレット等に
表示することで、切羽監視責任者が肌落ち危険箇所を認識し、坑夫への
退避等の指示を支援する(R3報文⑥)。

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



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 (R3報文⑧)

➤ 肌落ち災害の実態を調査し、分析、取り纏めた。 肌落ち災害事例

肌落ち災害の分析 計131件

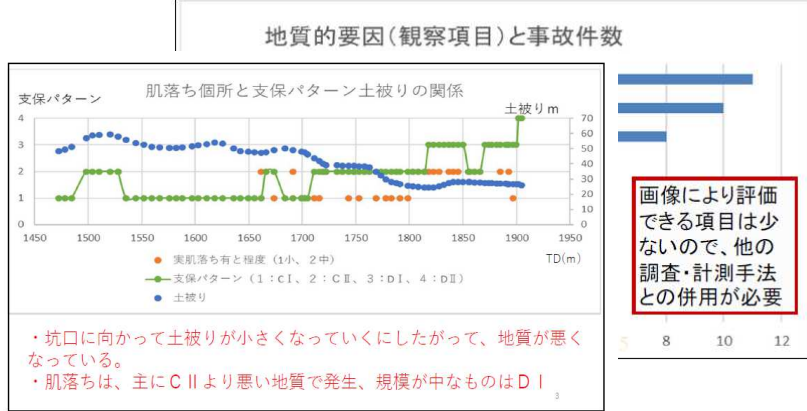
4社実績 24件 (2010~2019)
 鹿島 11件、戸田 6件、清水 4件 安藤間 3件

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31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		3 災害分析	
ヘルメットに右が当たった帽子に転んで右手薬指に打撲を負う			
1 災害発生状況	発生時刻: 2019年10月10日 16:20 発生場所: 山岳トンネル	問題	高圧水柱
2 災害発生状況図	発生状況図	原因	高圧水柱による打撲



実態調査結果の分析例



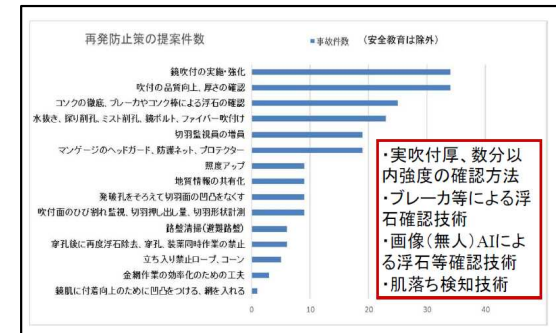
⑨ 肌落ち防止の有効な対策工選定 設計方法と実測方法の検討 (R3報文⑧)

➤ 対策工の有効性を評価、設計方法と実測方法取り纏めた。

肌落ち (吹付け剥落実績) 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
- 切羽観察簿 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 割れ目の方向性概観 割れ目の方向性概観 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



画像により評価できる項目は少ないので、他の調査・計測手法との併用が必要

⑩ AIを活用した肌落ち災害防止システムのコンセプト

➤ 肌落ち災害防止の実態を調査して取り纏めた。

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「切羽の肌落ち」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

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撮影した切羽面の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> ジャンボに搭載したプロジェクタで投影

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、令和元年度及び令和2年度の国土交通省建設技術研究開発助成を頂いて研究開発し、(一財)先端建設技術センターの自主研究で継続して開発した結果、現場で試行できるレベルになってきた。

ただし、広く活用いただける実用化に向けては、以下のような課題をクリアする必要がある、国土交通省の技術調査課、土木研究所他の各部署でご検討、ご指導頂きたい。

- 国土交通省の各地方整備局、NEXCO、地方自治体などの発注した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、統一された仕様での継続的な蓄積
- 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、既にいくつかの企業が構築を図り、商用化を目指しているところ、共同運営等の仕組み等の方向性の検討、整理等

なお、本支援システムについては、研究開発の継続と研究分担者の現場で試活用と改善を繰り返して、汎用性の高いものに作り込んでいきたいと考える。

参考資料 <令和元年度の研究開発成果の社外発表>

- 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

R2報文土木学会③

R2土木学会報文②

R2土木学会報文①

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 (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 橋立 健司 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 木山 智裕 清水建設(株) 正会員 江戸川 修一
 正会員 曾根 真理 戸田建設(株) フェロー 高橋 浩

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-

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 英壽
 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があり、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CALS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、各現場での照度の違いに対し、後から色補正を行うことができるよう、切羽に色見本(図-1参照)を設置して撮影を行った。また、撮影時に手振れ

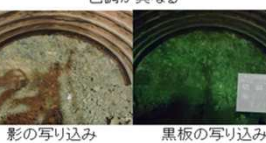
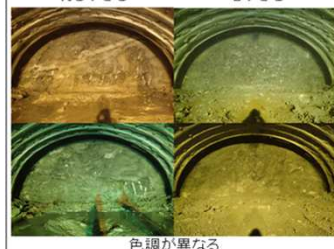
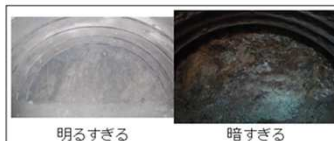


写真-1 現状の切羽観察写真の例

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	— (120m)	○ 1基(50m)	○ 2基ずつ (25m,35m,45m)
側壁照明	—	—	1基×2箇所 (15m)
ジャンボ照明	○ (20m)	○ (30m)	—
写真撮影用照明	○ (15m)	—	—
切羽照度	70Lx	90Lx	340Lx

※()内は切羽鏡面からの距離

ンター 正会員 ○杉本 翔平 (株)安藤・間 フェロー 鈴木 雅行
 ンター 正会員 村井 和彦 鹿島建設(株) フェロー 山本 拓治
 ンター 正会員 吉川 正 清水建設(株) 正会員 江戸川 修一
 羊大学 正会員 曾根 真理 戸田建設(株) フェロー 高橋 浩

(坑夫等)が減少し、若手の入職者も減少していることから人材確保が課題の一方策として、経験の浅い若手職員または作業員の判断・予測をAI技術で補完する。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るため、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。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

至った経緯

各工事発注者の切羽観察写真画像から切羽の状態を判断するには、切羽画像から得られた情報(岩質の情報、亀裂の情報)と、切羽画像以外から得られる情報(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)を組み合わせる必要がある。そのために、次の3点の検討を行う。1)予兆を判断する際、熟練作業員が個別に持っている予兆を判断する要素を知識として整理する。2)ヒアリングを行い、情報をセンシングする。3)予兆を判断する要素を知識として整理する。2)の検討を行うため、ヒアリングを行い、情報をセンシングを行った。検討フローを図-1に示す。

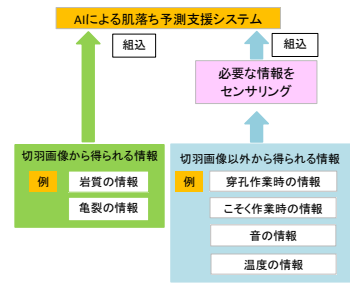


図-1 検討フロー

表-1 ヒアリング対象者

作業所名	年齢	経験年数	これまでの主な業務・職種
Aトンネル	40	20年	職長
	33	11年	職長
	43	18年	坑夫長
	50	18年	坑夫
	36	7年	坑夫
Bトンネル	35	3年	坑夫
	40	5年	坑夫
	42	19年	職長
Cトンネル	50	27年	切羽監視員
	43	22年	職長・坑内夫
	44	20年	坑夫
	48	21年	坑夫
	41	19年	坑夫

について

切羽の現象を把握するため、3現場において計15名にヒアリングを実施した。ヒアリングの質問事項はトンネル掘削、各作業項目及び自然現象に分類した過去の肌落ち発生時の現象やその時感、作業段階ごとに判断要素が多くあり、音、音などの聴覚の情報など、熟練作業員が持っていることが分かった。これに基づき、その回答が地盤工学上の現象を検証した。ヒアリング結果と検討結果を表-2に示す。

ヒアリング結果が多かった回答は、切羽をこそく作業する段階である。こそく作業、肌落ち、AI技術

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

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、支保保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.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。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、鏡吹付け)の経過した天井や側部の二次吹付けコンクリート(以後、二次吹付けと称する)との関連付けを試みた。

温度測定結果



写真-1 発破後の切羽 写真-2 発破後の切羽(赤外線画像)

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

図-1 発破計画図

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:藍色)	14.7 14.5 14.3

測定日時:2020.1.17 8:52



写真-3 こそく後の切羽(赤外線画像)

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:薄橙色)	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:薄藍色)	18.1 17.8 17.3

測定日時:2020.1.17 8:52

写真-4 鏡吹付け施工後の切羽

写真-5 鏡吹付け施工後の切羽(赤外線画像)

表-4 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:薄橙色)	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:薄藍色)	18.1 17.8 17.3

測定日時:2020.1.17 8:52

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

2丁目15番6号 (一財)先端建設技術センター TEL03-3942-3991

参考資料 <令和2年度の研究開発成果の社外発表>

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 —

② 同② 一切羽の画像撮影方法の最適化について — ③ 同③ 一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 —

R3土木学会報文④

R3土木学会報文③

R3土木学会報文②

R3土木学会報文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 —

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
— 一色見本を用いた色補正プログラム —

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
— 一切羽の画像撮影方法の最適化について —

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
(一財)先端建設技術センター フェロー 山本 拓治
東洋大学 正会員 曾根 真理
南安藤・間 正会員 山本 拓治
鹿島建設㈱ 正会員 宮嶋 保幸
- 正会員 金岡 幹
フェロー 高橋 浩
正会員 三木 茂
正会員 基礎地盤コンサルタンツ㈱ 正会員 田中 統藏
正会員 野村 貴律

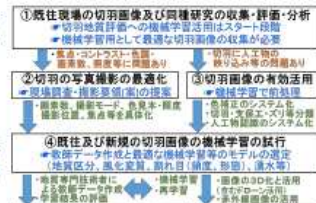
1. はじめに

トンネル切羽の地質評価や肌落ち発生兆候と防止の判断については、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、多くが彼ら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) 既往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9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・コントラストのパラッキ、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要領(案)を提案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、鏡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。赤みがかった切羽画像に対する白黒色見本のRGB値による補正を図-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のイメージを図-5に示す。
- 4) 既往及び新規の切羽画像の機械学習の試行
発注者用の切羽判定表の作成に必要な項目の中から、先ず、地質区分、風化区分、割れ目の頻度について、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。



- 独立 健司 (株)安藤・間 正会員 辰巳 順一
吉川 正 鹿島建設(株) 正会員 宮嶋 保幸
山本 拓治 清水建設(株) 正会員 上岡 真也
曾根 真理 戸田建設(株) 正会員 辻川 泰人
田中 統藏 日本システムウェア㈱ 正会員 野村 貴律

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について提案した切羽写真撮影要領(案)にしたがい、撮影を行い、に向けた撮影環境・対策

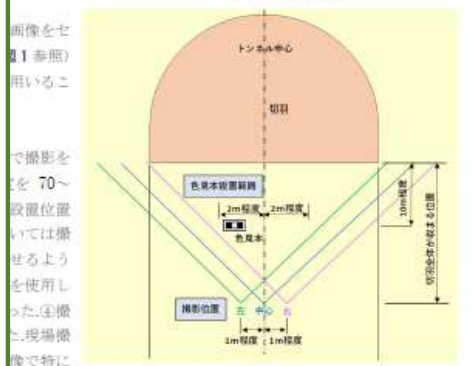
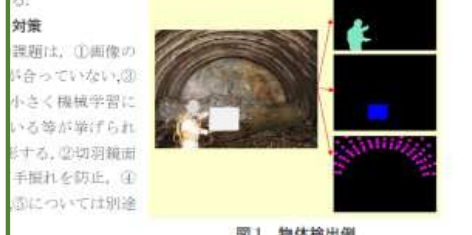


Figure 4: Color correction using a color chart. [黒:0,0,0] [白:255,255,255]の変化を相殺補正

- 正会員 辰巳 順一
正会員 宮嶋 保幸
正会員 小島 英郷
正会員 杉山 崇
正会員 野村 貴律

は、割れ目の程度、風化変質、地質区分等の分析、肌落ち可分析には切羽の色合いが重要な情報となるが、撮影に用いた色見本を用いた色補正プログラム

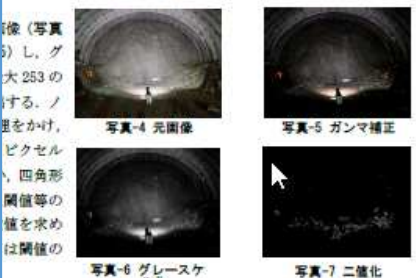


表-1 色見本の色定義 (RGB表記)

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

表-2 色見本の色定義 (CMYK表記)

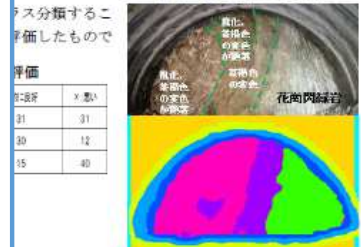
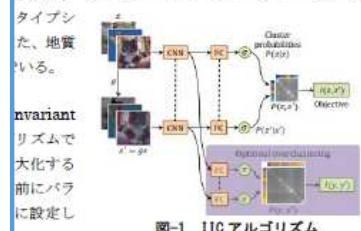
色	Cyan	Magenta	Yellow	Black
黒	93	88	89	80
白	0	0	0	0



写真、輪郭抽出、AI
6号(一財)先端建設技術センター TEL03-3942-3991

- (一財)先端建設技術センター 正会員 吉川 正
(一財)先端建設技術センター 正会員 村井 和彦
鹿島建設 正会員 宮嶋 保幸
戸田建設 正会員 高橋 浩
基礎地盤コンサルタンツ㈱ 正会員 三木 茂

切羽評価を踏まえて、色見本を用いた色補正プログラム



その結果を、Canny法とは画像のノイズ削減・輝度勾配手法である。今回は切羽上の割れ目のある箇所を短

後分類手法
(一財)先端建設技術センター TEL03-3942-3991

参考資料 <令和2年度の研究開発成果の社外発表>

⑤AI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⑤

一切羽画像から肌落ち予測の教師データについて

⑥同⑥ AIによる肌落ち予測支援システムのプロトタイプについて

⑦同⑦ 山岳トンネルのAI切羽判定システムにおける打突音について

⑧同⑧ 肌落ち災害と対策工の実態分析及びAIによる肌落ち予測への活用について

R3報文土木学会⑧

R3土木学会報文⑦

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⑧
—肌落ち災害と対策工の実態分析及びAIによる肌落ち予測への活用について—

R3土木学会報文⑥

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⑥
—AIによる肌落ち予測支援システムのプロトタイプについて—

R3土木学会報文⑤

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⑤
—一切羽画像から肌落ち予測の教師データについて—

基礎地盤コンサルタンツ(株) 正会員 ○三木 茂 (株)安藤ハヤマ 正会員 辰巳 順一
(一財)先端建設技術センター 正会員 吉川 正 鹿島建設(株) 正会員 白鷺 卓
(一財)先端建設技術センター 正会員 山本 拓治 清水建設(株) 正会員 上岡 真也
(一財)先端建設技術センター 非会員 近藤 一寿 戸田建設(株) 正会員 辻川 孝人
東洋大学 正会員 曾根真理 日本システムウェア(株) 正会員 野村 貴律

1. はじめに

肌落ちの予測は、切羽作業の安全性確保のため重要であるが、現場作業員および技術者により経験的に行われてきた。さらなる安全性確保、コソク作業の自動化に際して、AIによる自動予測が期待されている。しかし、AIの教師データとなる肌落ちデータの収集とデータ数が問題となる。そこで、切羽写真の活用が考えられるが、切羽写真から予測した肌落ちの妥当性が課題となる。ここでは、切羽写真から地質技術者が指摘した肌落ち予測と実際に発生した肌落ちの比較検証を行った結果を報告する。

2. 対象トンネルと肌落ち状況

対象トンネルは、延長約2kmの自動車専用トンネルであり、地質は花崗閃緑岩である。約432mの区間において吹付剥落のモニタリングを行った結果、約235mの区間で、35切羽56箇所で鏡吹き後の剥落が観察された。なお、モニタリング区間において、肌落ち予測に用いた切羽写真数は78であり、剥落が生じた切羽の地山区分は、CI(6切羽)、CII(18切羽)、DI以上(11切羽)であった。剥落した吹付片は、地山岩塊と一体であったことから、切羽の肌落ちとみなし比較検証を行った。

3. 比較検証方法

対象トンネルでは、2人(A、B)の地質技術者が、切羽写真から肌落ちが予測される箇所の教師画像の抽出を行っていた。2人の地質技術者は、実際の切羽観察行っておらず、写真での予測であり、肌落ちが発生した場所は知らされていない。肌落ち予測の比較検証は、吹付剥落箇所から切羽写真上での剥落箇所の同定、2人の地質技術者の肌落ち予測箇所との比較の手順で行った(図-1)。また、予測位置の比較は、①肌落ち発生箇所と予測箇所が概ね一致、②類似箇所を予測、③無関係な箇所を予測、④予測無しの場合で行った。図-1の例では、技術者Aは肌落ち発生箇所と類似箇所を予測し、技術者Bは類似箇所を予測していたが、発生箇所は予測していなかったことになる。また、肌落ちが発生した箇所、地質技術者が肌落ちを予測した箇所について要因パターン分けを行った。なお、肌落ち発生箇所が、切羽写真においてズリで隠れていた1切羽1箇所については、比較検討から除外した。

キーワード AI トンネル 肌落ち 切羽観察写真

連絡先 136-8577 東京都江東区亀戸1-5-7(錦糸町プライムタワー) 基礎地盤コンサルタンツ(株) TEL.03-6361-9873

山岳トンネルのAI切羽判定システムにおける打突音について

藤想画 正会員 田中 統藏

初川 正 (一財)先端建設技術センター フェロー 山本 拓治
藤立 健司 勝安藤・間 正会員 辰巳 順一
清水建設㈱ 正会員 小島 英輝
日本システムウェア㈱ 正会員 野村貴律

正会員 ○村井 和彦 日本システムウェア㈱ 正会員 野村 貴律
正会員 吉川 正 勝安藤・間 フェロー 鈴木 雅行
フェロー 山本 拓治 鹿島建設㈱ 正会員 白鷺 卓
正会員 曾根 真理 清水建設㈱ 正会員 小島 英輝
正会員 三木 茂 戸田建設㈱ 正会員 杉山 崇

用事例が飛躍的に増えつつある。このような状況を踏まえ、筆者らの研究を実施している¹⁾。本稿では、各種AI技術のうち画像分における肌落ちを予測するシステムのプロトタイプについて、その

特性を画像から推定することとし、深層学習の手法としては画像分類用ResNet50(Residual Network-50)²⁾を使用した。このResNet50は、ネットワークであり、Residual learningを実装することで効果的に学習が進んでいる。具体的には、100万枚を超えるイメージで学習させた事前学習³⁾から読み込み、今回使用したデータセットを転移学習させて物体である関心領域(Region of Interest: ROI)を特定し、バウンディングボックスを組み込み、分析を実施した。なお今回の検討では、画像化したデータ数が十分ではないため収束せず、学習ができない結果の環境は構築できているため、今後十分なデータが揃った際、さら



図-1 ResNet50の概念

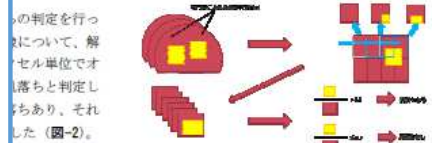


図-2 データセットの作成

計3761箇所を抽出し、学習データとして用いた。また、切羽画像792枚を学習データとして用いた。

より、本システムが示す予測領域は、専門家が判定した予測領域と一致していることがわかる。

切羽画像、深層学習、画像分類手法、推論の可視化検証
15番6号(一財)先端建設技術センター TEL.03-3942-3991

支援システムの開発に関する共同研究を行っている。本稿はこのことについて説明するものである。

しては、CNNを用いた画像認識AIなどの導入に向けた取り組み(土木以外の分野においては、画像処理AI以外に音声認識AI、言った様々なAIの活用が行われているのが現状である。可能性が高い画像処理AIの活用に関する開発を中心に進めつつ、土木以外の分野の活用が想定される。本稿においてはこのことについて説明を行うものである。

に肌落ちの兆候を見つけるためのシステム開発を行うために、現場作業員へヒアリング調査を行った。このヒアリング結果から、「肌落ちの可能性が少ない地盤に関してはカンカンのような音による認識など様々な情報も処理していることが分り、」「肌落ちの可能性が少ない地盤に関してはカンカンのような音による認識など様々な情報も処理していることが分り、」

人間の可聴域内の音声のみを認識することで十分である。しかし、音声も含めた分析を対象とすることにした。

一定範囲周波数の空気振動を音声として認識する。しかし、トンネル壁及び掘削機械から発生する振動の周波数は人間の可聴域外の周波数である。また、掘削機械から発生する振動の周波数は人間の可聴域外の周波数である。また、掘削機械から発生する振動の周波数は人間の可聴域外の周波数である。また、掘削機械から発生する振動の周波数は人間の可聴域外の周波数である。

時間(横軸)と音圧(縦軸: dB)との関係を示したものである。プロットしていることがわかる。

数(縦軸: Hz)毎の音圧を色調で表現したものである。赤に近づくほど音圧が高くなる。人間の耳がよく聞き取れるのは2,000Hz-4,000Hzといわ

正会員吉川正 勝安藤・間フェロー 鈴木雅行
正会員上岡真也 鹿島建設㈱正会員 白鷺卓 東洋大学正会員
建設技術センター 正会員 橋立健司 正会員 杉本翔平

収集し安全対策の提案をした。その後、2016年に厚生労働省災害防止対策に係るガイドライン²⁾を策定し、2018年に当

切羽支援システムの構築のための第一歩として、2011年までの調査で2011年以降に実施されたアンケート結果³⁾やその他のデータに基づき、2010年以降の詳細な肌落ち災害事例を統



図-1 肌落ち災害事例数

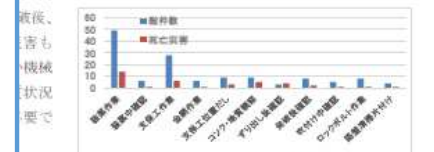


図-2 切羽作業別災害事例数

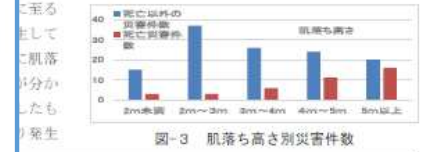


図-3 肌落ち高さ別災害事例数

(一財)先端建設技術センター TEL.03-3942-3991