

交通運輸技術開発推進制度  
研究成果報告書  
(ダイジェスト版)

画像を用いたトンネル健全度自動判定・  
要注意箇所表示技術の開発

令和6年3月

公益財団法人鉄道総合技術研究所

## I. 研究開発成果の要約

作成年月	令和6年3月
研究課題名 (課題番号)	画像を用いたトンネル健全度自動判定・要注意箇所表示技術の開発
研究代表者名	公益財団法人鉄道総合技術研究所 野城一栄
研究期間	令和3年9月1日～令和6年3月31日
研究の目的	<p>鉄道トンネルは、道路や水路等のトンネルに比べて約2倍の経年を有している。古くから2年に1度の定期検査が法令で義務付けられ、熟練した検査員による健全度の判定および要注意箇所は入念な確認が行われてきた。ただし、今後は少子化に伴い熟練検査員の確保が困難になり、従来の検査精度が確保できなくなるおそれがある。また、鉄道トンネルの作業環境は悪く、要注意箇所の確認に時間を要しているという課題もある。</p> <p>本研究では、健全度の判定作業をAIで自動化する「健全度自動判定システム」、覆工に要注意箇所を投影することで位置の特定を容易にする「覆工投影装置」を開発することで、上記の課題を解決し、鉄道トンネルの定期検査の省力化と高速化を図る。</p>
研究成果の要旨	<p>(1) 健全度自動判定システムの開発</p> <p>撮影画像からトンネルの健全度を自動判定するアルゴリズムをソフトウェア化するとともに、撮影画像と健全度判定結果等をパソコンのディスプレイ上に表示できるビューアソフトを製作した。またYOLOv5xを適用したAIモデルにより、変状抽出精度90%以上を実現し、健全度自動判定結果は、鉄道事業者の実際の健全度判定とトレンドが概ね一致することを確認した。</p> <p>(2) 覆工投影装置の開発</p> <p>要注意箇所の投影のため、健全度自動判定プログラムから判定結果を取得し、キロ程やトンネル覆工の曲率、投影距離に合わせて補正したメッシュ図を自動で作成する投影プログラムおよび投影装置を製作した。特に、本年度は、現地検証を実施して、実務上問題ない照度および精度で投影できること、通常の検査と検査効率を比較した結果、検査時間の50%短縮が可能となることを確認した。</p>
知的財産権 取得状況	<p>特許出願 1件</p> <p>著作権登録 0件</p>
研究成果発表実績	<p>論文発表：国内 2件、海外 1件</p> <p>口頭発表：国内 2件、海外 0件</p> <p>その他：国内 0件、海外 0件</p>

## II. 研究開発の目的と実施体制

### (1) 研究開発の目的

鉄道トンネルは戦前や高度経済成長期に建設されたものが多く、延命化に対する対応が必要な時代に入っている。日々の巡回のほか、古くから2年に1度の定期検査が法令で義務付けられ、熟練した検査員による健全度の判定および要注意箇所の入念な確認が行われてきた。ただし、今後は少子化に伴い熟練検査員の確保が困難になり、従来の検査精度が確保できなくなるおそれがある。また、暗いトンネル坑内において、事前に準備した手元の資料と現地を照合しながらの作業となるため、要注意箇所の確認に時間を要しているという課題もある。

そこで本研究では、「健全度自動判定システム」、「覆工投影装置」を開発し、定期検査の省力化と高速化を図る（図1）。



図1 本研究で開発する技術と検証方法

#### a) 健全度自動判定システム

定期検査の健全度判定を自動化し、要注意箇所を抽出するシステムを開発する。「鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル」<sup>1)</sup>に準拠した自動判定アルゴリズムを構築し、これをソフト

ウェア化する。また、単体でも判定結果を確認できるようにビューアソフトも作成する。

### b) 覆工投影装置

要注意箇所を覆工に投影する装置を開発する。装置は投影機とロータリーエンコーダからなり、軽便トロなどに搭載する。

なお、本研究では、健全度の自動判定アルゴリズムの一部に、機械学習（ディープラーニング）の技術を活用する。この技術の維持管理への活用例として、ひび割れを自動抽出するシステムが実用化されている（鉄道総研以外では、例えば図2、図3）。

本研究の独自性としては、既存技術で実用化に到達していない健全度判定に焦点をあて、定期検査全体にデジタル技術の導入を図るところにある（図4）。

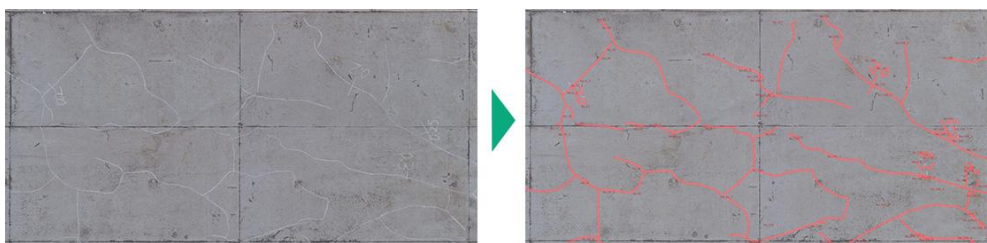


図2 富士フィルム「ひびみつけ」<sup>2)</sup>

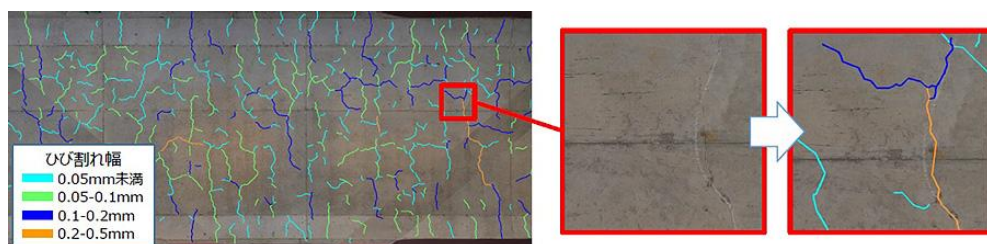
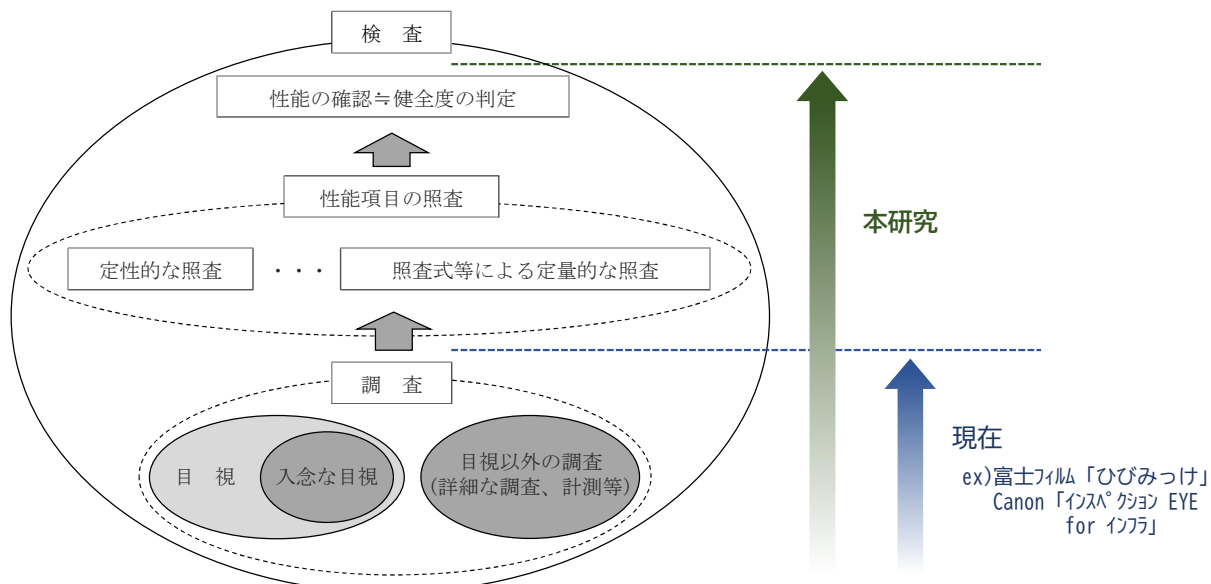


図3 Canon「インスペクション EYE for インフラ」<sup>3)</sup>

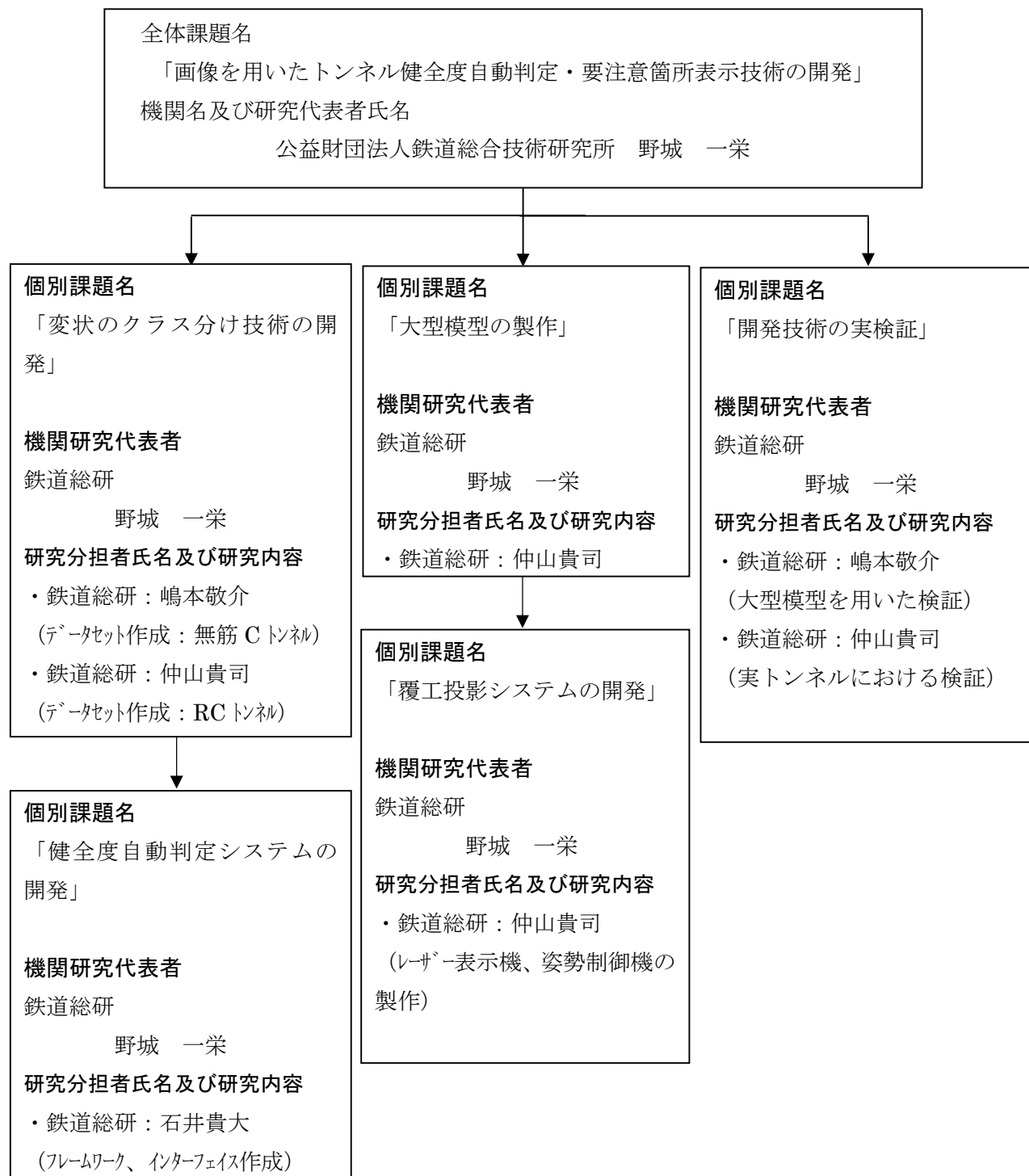


【鉄道構造物等維持管理標準・同解説（トンネル）における検査の流れ】  
※詳細は3章で解説

図4 鉄道トンネルの検査と本研究の関係 <sup>1)</sup>に加筆・修正

## (2) 研究実施体制

本研究は、公益財団法人鉄道総合技術研究所が単独で実施する。研究実施の流れを示すチャートは以下の通りである。



### Ⅲ. 研究開発の成果

#### 1. 序 論

鉄道トンネルは、戦前または高度経済成長期に建設されたものが多く（図 1-1）、道路や水路などのトンネルに比べて約 2 倍の経年を有している。古くから法規・法令等が整備され、鉄道事業者は届け出た実施基準に基づき定期検査を実施してきた。

公益財団法人鉄道総合技術研究所（以下、鉄道総研）では、早くから検査へのデジタル技術の導入を試み、「①トンネル壁面の連続画像を撮影する技術」、「②連続画像からひび割れを自動抽出してひび割れ展開図を作成する技術」を開発している。ただし、これらの技術はあくまでも検査作業の半分程度を省力化したに過ぎない。ひび割れ展開図の作成後に行う、「③健全度判定と要注意箇所の確認」は未だに熟練技術者に頼っており、また、要注意箇所の確認は、現地で紙資料と比較することで行われるが、トンネル坑内は暗く、時間を要している（図 1-2）。

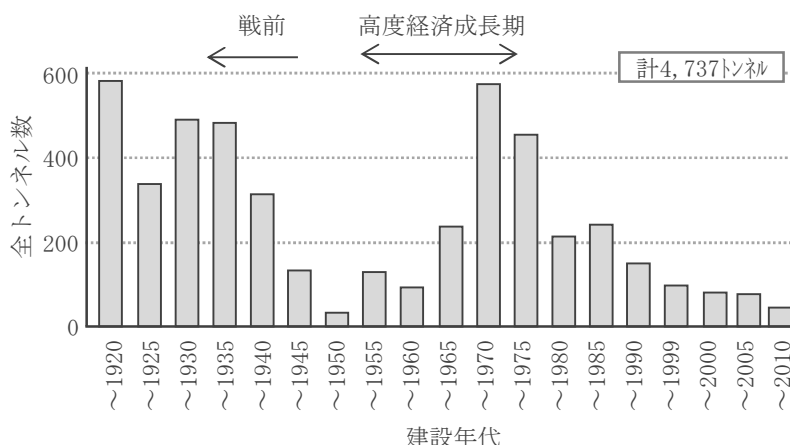


図 1-1 鉄道トンネルの建設年代 <sup>1)</sup>に加筆・修正

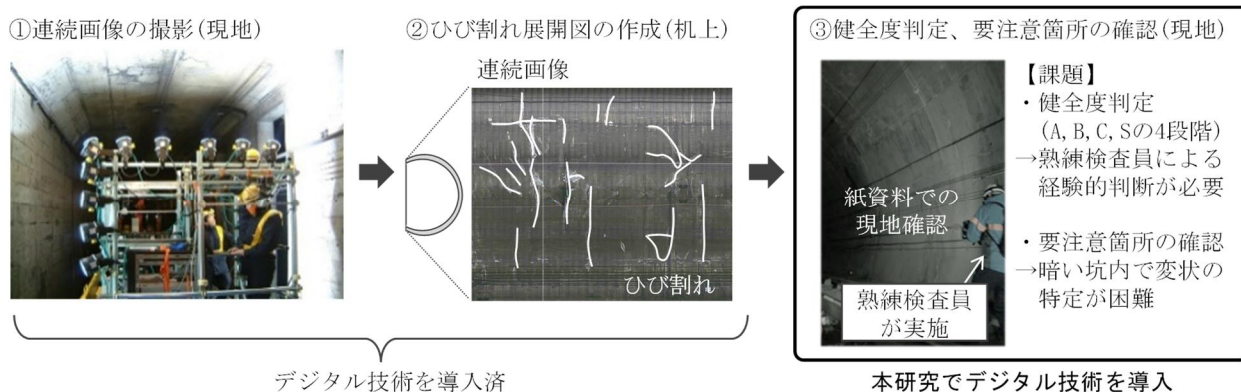


図 1-2 現状の検査技術と本研究の位置づけ

これらの課題解決のため、本研究では③にデジタル技術を導入する。具体的には、健全度の判定作業をAIで自動化する「健全度自動判定システム」、覆工に要注意箇所を投影することで位置の特定を容易にする「覆工投影装置」を開発する（図 1 参照）。

これらの技術を用いることで、事務所において、AIによる健全度（A、B、C、S）の自動判定が行われるほか、実トンネルにおいては、要注意箇所を照射器で投影しながら確認することが可能になる。これらの技術の社会実装により、従来の健全度判定や要注意箇所の現地確認に要していた要員を3/4に、時間を1/2に短縮することを想定している。また、打音やたたき落とし作業についても、これまで覆工全域で実施してきたものを要注意箇所のみに限定できるようになり、作業量を大幅に縮小することが可能となる。

なお、本研究の成果は、日本全国の様々な事業規模の鉄道トンネルの維持管理に有用であるのみならず、今後同様な問題に直面すると思われる道路トンネルにおいても導入できるものであると考える。

(1) 開発工程

図 1-3 に、当初計画の研究フローと各年度の主な目標を示す。

年度	令和3年度 (2021)	令和4年度 (2022)	令和5年度 (2023)
フロー	<ul style="list-style-type: none"> <li>変状のクラス分け技術の開発</li> <li>大型模型の製作</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>健全度の自動判定システムの開発</li> <li>覆工投影装置の開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>開発技術の実検証</li> </ul>
目標	<ul style="list-style-type: none"> <li>「ひび割れ展開図」および「連続画像」の情報をもとに、ひび割れと漏水について、<b>変状の程度をクラス分けする技術</b>を開発</li> <li><b>大型模型の製作</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>クラス分け結果をふまえて、<b>健全度と要注意箇所</b>を表示するプログラムを開発</li> <li><b>要注意箇所</b>を実際のトンネルの覆工に投影して明示する装置を開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>開発した「<b>健全度自動判定システム</b>」、「<b>要注意箇所投影装置</b>」をトンネル模型及び実際の鉄道トンネルを用いて実証</li> <li>課題点があれば改善し、システムとしての精度、完成度の向上を図る</li> </ul>

図 1-3 研究フローと各年度の目標

a) 令和3年度

・変状のクラス分け技術の開発

撮影画像からトンネルの健全度を自動判定するアルゴリズムを考案した。また、このアルゴリズムをソフトウェア化するとともに、撮影画像と健全度判定結果等をパソコンのディスプレイ上に表示できるビューアソフトを試作した。実際の撮影画像を用いて、アルゴリズムを検証し、実務上問題ない精度の判定が得られることを確認した。

なお、当初計画では健全度判定に必要な変状を抽出・クラス分け技術を開発することが目標であったが、令和4年度の「健全度自動判定システムの開発」についても先行着手した。

・大型模型の製作

令和4年度からの装置開発に向けて大型模型を製作した。覆工部分は可動性を重視してFRP製とし、アーチ型（4体）と矩形型（1体）の計5体製作した。また、下床版部はコンクリート平板とし、様々な投影状況（投影距離や角度等）を模擬できるように8m×5mの大きさに1体製作した。

b) 令和4年度

・健全度自動判定システムの開発

変状の抽出・クラス分け精度を向上するため、更なる変状写真の収集を行うとともに、クラス分けの

拡張を行った。また、ソフトウェア化するとともに、ビューアソフトについても利便性向上のための改良を施し、要注意箇所をメッシュで表示可能とした。

### ・覆工投影装置の開発

要注意箇所を覆工に投影する装置を開発した。装置は投影機と移動補正用のロータリーエンコーダからなり、軽便トロに搭載して使用できる仕様とした。また、令和3年度および本年度に製作した大型模型を使用して、投影検証を行った。

## c) 令和5年度

### ・開発技術の実検証

実トンネルで開発技術を適用し、熟練検査員が従来の方で実施した場合との精度、省力化程度の比較を行った。検証対象として、神戸市交通局が保有する馬蹄形、円形および矩形のトンネルで実施した。

## 2. 本研究の成果の概要

### 2. 1 開発成果

本研究では、鉄道トンネルの定期検査業務の高速化と省力化を図るための2つの技術を開発した。

1つめの技術は、図2.1-1に示す「健全度自動判定システム」で、壁面画像からAIで変状を抽出して、現地で直接確認すべき要注意箇所を特定するとともに、指定区間毎の健全度の判定を行うことができるアプリケーションである。鉄道事業者の検査台帳との比較から、画像上の変状を90%以上の精度で抽出できること、要注意箇所の現地確認前に、地下路線全体の健全度のトレンドを捉えられることを確認している。現状は、壁面画像への変状の書き込みをはじめとする検査台帳の整理作業は全て人手に頼っているため、本システムを用いることで、業務の高速化と省力化が期待できる。

2つめの技術は、図2.1-2に示す「要注意箇所投影システム」で、健全度自動判定システムで特定した要注意箇所の位置を、現地で投影できる移動式のプロジェクションマッピング装置（以下、「投影装置」）である。要注意箇所を赤色で着色したメッシュをトンネル断面形状に合わせて補正し、台車の走行に合わせて連続して投影していくことができる。壁面画像の確認でもトンネルの健全度はある程度想定する

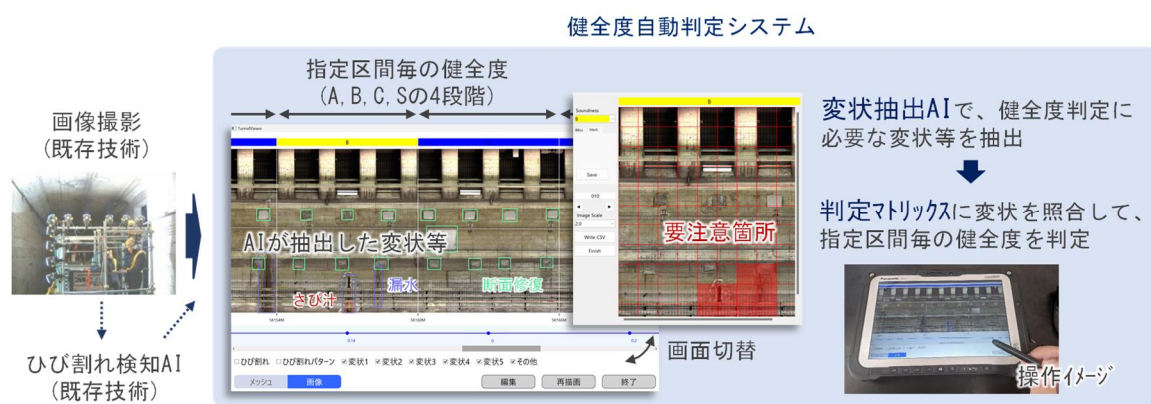


図 2.1-1 健全度自動判定システム



図 2.1-2 要注意箇所投影システム

ことができるが、これを確定するためには、現地での目視確認が必要になる。現状、注視すべき要注意箇所の現地照合は紙資料で行うことが一般的である。システムを用いることで、要注意箇所の現地照合が容易になり、現地確認作業の速度を約 2 倍に向上できることを確認している。

これらのシステムは単独でも使用可能であるが、すべてのアプリケーションを 1 つの画面上から起動し、要注意箇所のデータを相互に連携できる、プラットフォーム機能を備えた統合アプリケーションも開発している。これにより、画像の読込から現地での要注意箇所投影まで円滑に行うことができる。

2.2 では、システムの概要を述べるとともに、システムを用いて変状抽出と健全度判定を行い、実際の検査台帳と比較検証した結果を示す。2.3 では、投影装置の概要を述べるとともに、モックアップと実トンネルで投影精度を検証した結果を示す。

## 2. 2 健全度自動判定システム

健全度自動判定システムでは、「変状抽出 AI」が変状等を抽出し、これらを「判定マトリックス」と照合して、最も重い判定を指定区間毎の健全度として出力する。また、抽出した変状の一部を、現地で直接確認すべき要注意箇所として要注意箇所投影システムに受け渡す。

### 2. 2. 1 変状抽出 AI の構築と検証

変状抽出 AI では、機械学習（ディープラーニング）のうち、画像上の対象をボックスで囲う物体検出技術を用いて撮影画像から変状等を抽出する。機械学習とは、コンピューターに情報を反復的に学習させ、対象を検出するためのアルゴリズムを自動で構築する方法であり、このうち、ディープラーニングと呼ばれる技術では、人為的な数理モデルを与えず、人間の脳を模したネットワークモデルで情報の分析が行われる。本研究での抽出対象を図 2.2-1 に示す。ひび割れについては既に検出 AI が実用化されているため、本研究では、鉄道構造物等維持管理標準・同解説（トンネル）りに示される、その他の健全度判定に必要な変状等を抽出する AI を構築した。鉄筋露出、錆汁および漏水を対象にしたほか、エフロレンス、鉄バクテリアなどに覆われたひび割れは抽出が難しく、これらが健全度判定の手掛かりになることから抽出している。さらに、断面修復、導水樋設置個所についても、施工の良し悪しが健全度に影響することが維持管理の実績のなかで明らかになりつつあり、抽出対象とした。

教師データには、鉄道総研がこれまでに蓄積してきた変状画像を用いた。データ拡張後のアノテーション

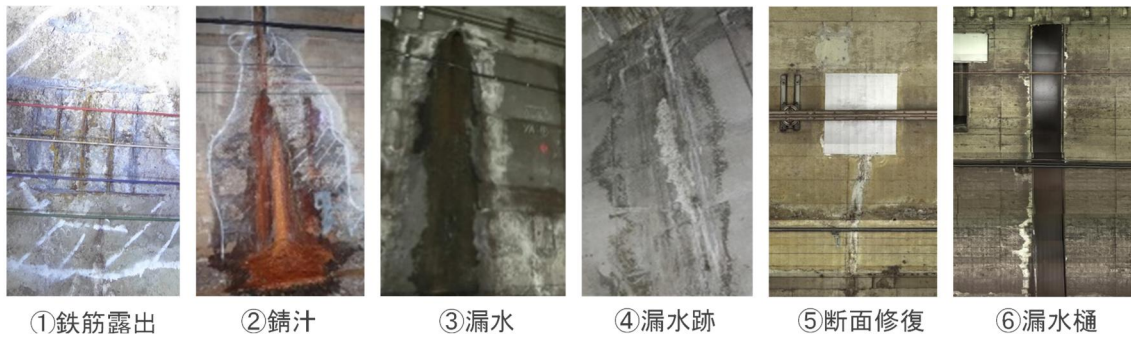


図 2.2-1 本研究での抽出対象

表 2.2-1 アノテーション数 (データ拡張後)

No.	状 況	表示色	アノテーション数
0	鉄筋露出箇所	紫	512
1	錆汁、鉄バクテリアが発生している箇所	赤	2704
2	漏水、表黒褐色に変色している箇所	青	15684
3	エフロレッセンス、遊離石灰が発生している箇所	水色	5452
4	断面修復箇所	緑	2774
5	導水樋設置箇所	緑	1200

アノテーション数を表 2.2-1 に示す。アノテーションとは、画像に写る抽出対象にタグ（本研究ではボックス座標とカテゴリ）を付与することをいう。人の顔や交通標識の認識などでは抽出対象が誰にでも分かりやすく、アノテーションに専門知識を必要としない。一方、本研究の抽出対象はトンネルの変状であり、適切に見分ける専門知識が必要になる。そのため、本研究では、アノテーションを全て鉄道総研が実施した。

アルゴリズムには、ディープラーニングに基づいた物体検出モデルの 1 つである YOLO (You Only Look Once) を使用した。YOLO の特徴は、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を活用し、一回の画像走査で画像の中にある複数の物体の検出と識別を同時に行う。これにより、画像全体に存在する物体の種類と位置を高精度かつ迅速に検出することが可能とされている。本研究では、研究開始時の最新シリーズであった YOLOv5 を用いた。YOLOv5 のモデルには、ネットワークのサイズに応じて s、m、l、x の 4 種類がある。s モデルから x モデルになるのに伴い、必要なメモリ量が増え、学習に要する時間が増えるが、検出精度は高くなるとされている。図 2.2-2、図 2.2-3 に、モデルおよびエポック数（全てのデータを学習させた回数）を変えて学習させた結果の一例を示す。図 2.2-2 は、s モデルを用いた場合について、学習済モデルの評価指標である mAP@0.5、F1 値とエポック数の関係を示したものである。エポック数が 750 まで評価指標の向上がみられることがわかる。また図 2.2-3 はモデルと評価指標の関係であり、m と l で評価指標の向上がみられることがわかる。なお、バッチサイズはモデルに応じて適宜変更した。

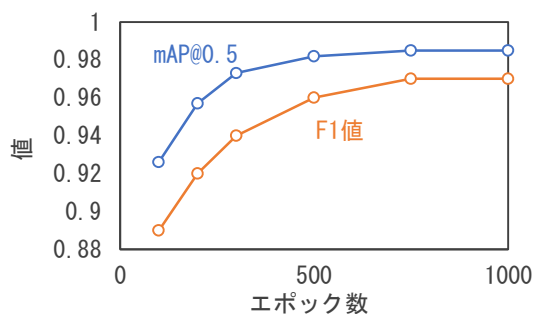


図 2.2-2 YOLOv5s での学習結果 (バッチサイズ: 32)

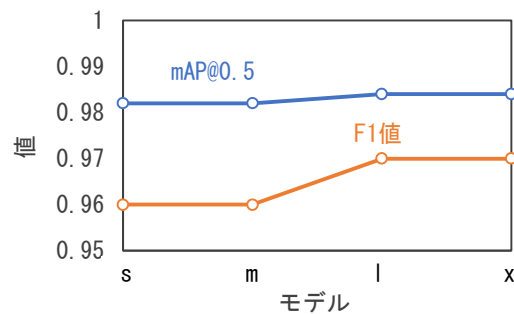


図 2.2-3 YOLOv5s~x での学習結果 (エポック数: 500)

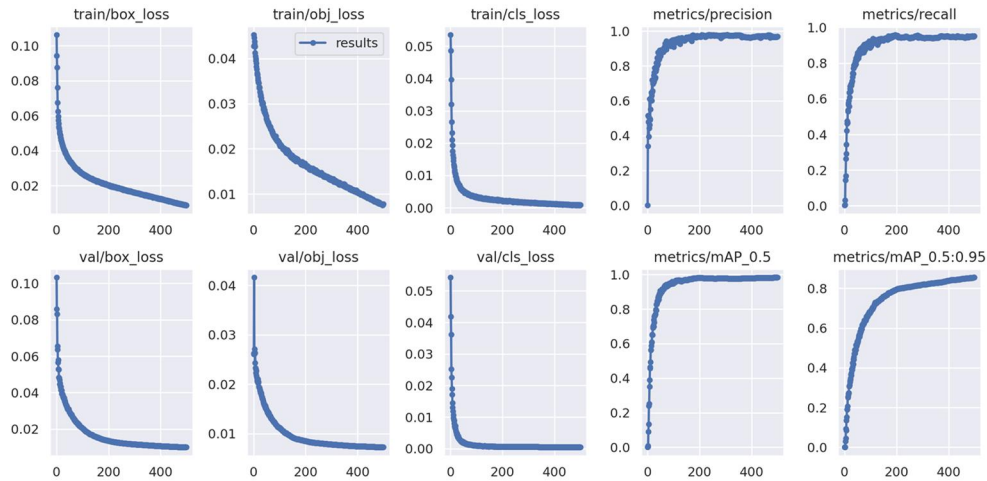


図 2.2-4 選定したモデルの学習曲線

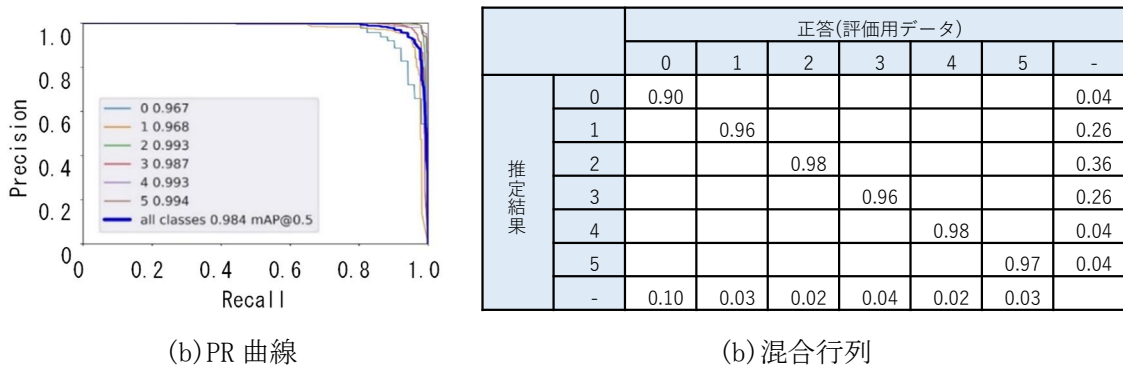


図 2.2-5 選定したモデルの精度

このようにして作成した学習済モデルを用いて学習に使用していない画像からの変状等の抽出結果の目視確認を行ったところ、今回のデータに対しては、YOLOv5x (エポック数 500) が最良と考えられた。

図 2.2-4 にこの選定したモデルの学習曲線を示す。全て収束に向かうところで学習は終了されており、過学習の傾向はみられていないことがわかる。また、F1 値は 0.96、PR 曲線と混合行列は図 2.2-5 の通りであり、混合行列において、鉄筋露出箇所は 90%、さび汁、漏水、漏水跡、補修跡および導水樋を 95% 以上抽出できていることがわかる。なお、鉄筋露出箇所のみ抽出率が低い理由としては、アノテーション数が少ないことに起因していると考えている。

## 2.2.2 判定マトリックスの構築と検証

鉄道構造物等維持管理標準・同解説 (トンネル) <sup>1)</sup> では、表 2.2-2 に示す健全度の判定区分が示されている。通常全般検査では、目視を主体として健全度を A、B、C、S のランクに区分する。ただし、運転保安、旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす変状を発見した場合には健全度 AA と判定し、緊急に措置を講じる。なお、個別検査では、健全度 A と判定された構造物に対して、計測器等も用いた詳細な照査を実施し、さらに細分化した判定を行う。本研究では、鉄道構造物等維持管理標準・同解説 (トンネル) <sup>1)</sup> に示される性能項目のうち、トンネル構造の安定性を対象として、通常全般検査に相当する A、B、C、S の 4 段階の判定を行うこととした。

表 2.2-3 に判定マトリックスを示す。鉄道構造物等維持管理標準・同解説 (トンネル) <sup>1)</sup> に記載する標準

的な判定例を反映しつつ、安全側の判定が得られるよう作成した。システム内では、この判定マトリックスに個々の変状をあてはめ、最も重い判定を指定区間の健全度としている。各変状には「影響大」、「影響小」の2段階を設定した。スプリングラインより上方に変状がある場合、抽出ボックスが画像に占める線路方向の密度が大きい場合（20%以上）は「影響大」とすること、断面修復、導水樋設置箇所については健全度Cすること、表 2.2-1 の No.1～3 を要注意箇所として出力することを標準設定としている。

なお、トンネルの健全度には路線毎の特情（地盤条件や周辺環境など）も考慮する必要がある。そのため、この判定マトリックスは適宜調整されることを前提としており、システムには出力結果の手補正もできるよう、エディタ機能も搭載した。

図 2.2-6 に、前述した「変状抽出 AI」と「判定マトリックス」による出力結果の一例を示す。学習に使用していない画像を用い、線路方向 10m 毎に分割した区間を指定した。この図から対象とした変状が種類毎に異なる色のボックスで囲われ、変状に応じた健全度が画像上方に表示されていることがわかる。

表 2.2-2 構造物の状態と標準的な健全度の判定区分

健全度	構造物の状態	
A	AA	運転保安、旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす、またはその恐れのある変状等があるもの
	A1	進行している変状等があり、構造物の性能が低下しつつあるもの、または、大雨、出水、地震等により、構造物の性能を失う恐れのあるもの
	A2	変状等があり、将来それが構造物の性能を低下させる恐れのあるもの
	B	将来、健全度 A になる恐れのある変状等があるもの
C	軽微な変状等があるもの	
S	健全なもの	

表 2.2-3 標準的な判定例をまとめた判定マトリックス

	鉄筋露出	錆汁、鉄バクテリア	漏水、表黒褐色	エフロレッセンス、遊離石灰
新規・進展	AAorA		A	
上記以外	影響大	A	B	C
	影響小	A	C	C

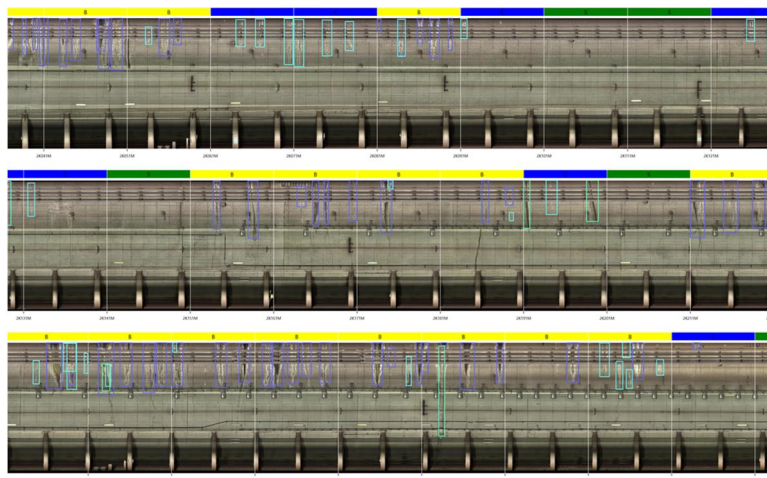


図 2.2-6 判定結果の一例（開削トンネル）

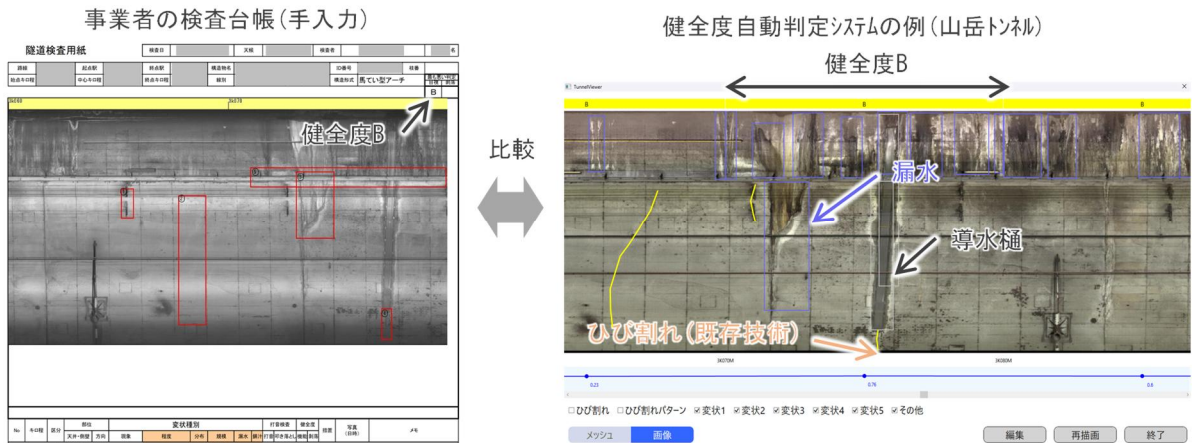


図 2.2-7 健全度判定の検証方法

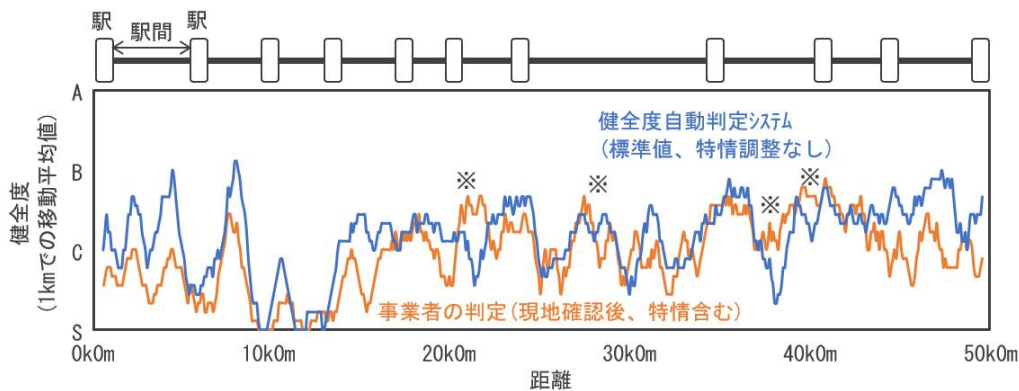


図 2.2-8 健全度判定の検証結果

健全度の判定精度については、図 2.2-7 に示すように、鉄道事業者の検査台帳と比較することで検証した。なお、抽出対象とした変状に対しての健全度のみを比較しており、健全度自動判定システムでは、路線の特情を考慮せず標準設定で判定を行った。図 2.2-8 には 10 駅間の検証結果を示す。1km で移動平均した健全度のトレンドを比較したものである。検査台帳の健全度は要注意箇所の現地確認後の最終判定ではあるものの、システムは事前にその傾向を捉えていることがわかる。なお、図 2.2-8 の※印のように、健全度自動判定システムのほうが危険側の判定をしている箇所もある。これらは補修後に対して重い判定をしているなど、検査員が出力結果の確認の際に修正することを想定している部分であった。

### 2. 2. 3 健全度自動判定システムのまとめ

以上の結果から、鉄道事業者の検査台帳との比較から、画像上の変状を 90%以上の精度で抽出できること、要注意箇所の現地確認前に、地下路線全体の健全度のトレンドを捉えられることを確認した。現状は、画像上への変状の書き込みをはじめとする検査台帳の作成は全て人手に頼っている。システムを用いることで、人の作業はシステムが出力した結果の確認と修正のみになるため、業務の高速化と省力化が期待できると考えられる。

## 2. 3 要注意箇所投影システム

### 2. 3. 1 投影装置の概要

図 2.3-1 に開発した要注意箇所投影システムの概念図を示す。健全度自動判定システムで特定した要注意箇所を赤く塗潰した 1m 四方のメッシュ図をトンネル壁面に投影できる、移動式のプロジェクションマッピング装置である。

投影装置は、軽便トロの上にプロジェクターを固定するための回転台座、超短焦点プロジェクター、移動距離測定装置および制御装置からなる。また、プロジェクターの回転、投影位置の微調整は、無線通信（Bluetooth 規格）を介してタブレット PC で行う。

図 2.3-2 に示すように、メッシュ図は、あらかじめ入力したトンネル形状座標に応じて、アプリケーションが自動で形状補正する。また、移動距離測定装置で得られる台車走行に応じて水平移動する。

図 2.3-3 に形状補正方法の概念図を示す。本研究では、使用するプロジェクターに制約が生じないように、プロジェクターによる光学補正などの機能は一切使用せず補正する方法を構築した。この場合、プロジェクターが投影しようとする面は図 2.3-3 内の「投影面」となる。実際に投影するのは図 2.3-3 内の「壁面」であり、光源からの到達距離が異なる。そのため、光源からの到達距離に合わせて投影するメッシュ図をいびつな形状に補正する。図 2.3-3 のように、壁面に長さ L 四方の 2 メッシュを投影したい場



図 2.3-1 要注意箇所投影システムの概念図

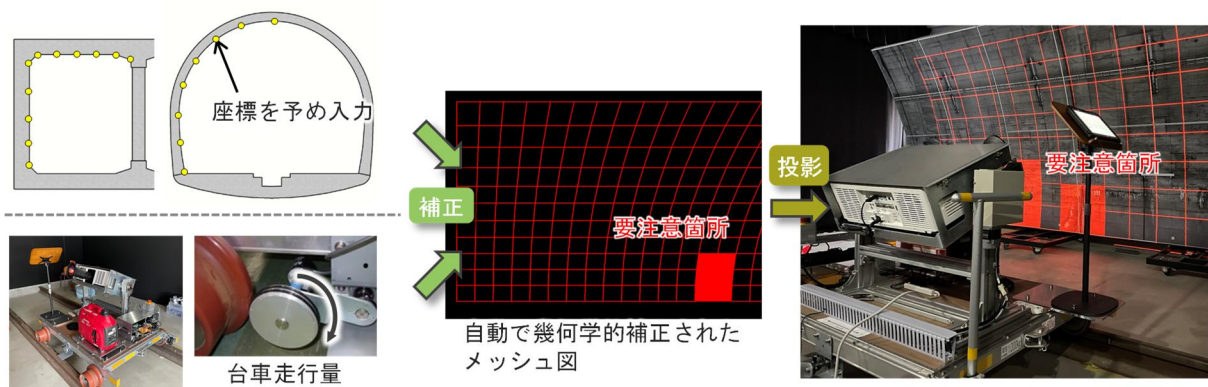


図 2.3-2 メッシュ図の補正の流れ

合、 $L_1$ 、 $L_2$  の長方形メッシュに補正する。水平方向についても同様に補正を加えることで、図 2.3-2 の中央に示した補正したメッシュ図を生成することができる。

移動距離測定装置については、本研究では、10~20m 毎にある目地や壁面などに示されているキロ程などに合わせて、投影位置の微調整を適宜行うことを前提とした。そのためレール上を回転する小型円盤の回転数をロータリーエンコーダーで計測し、距離に換算する簡易な仕様とした。

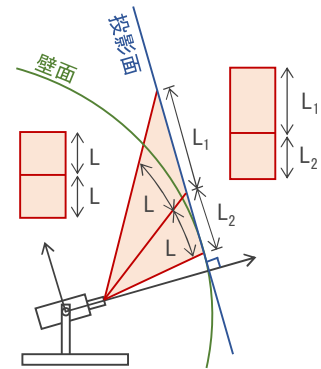


図 2.3-3 形状補正方法

## 2. 3. 2 モックアップによる検証

### (1) 投影照度

投影装置の製作に先立ち、要注意箇所が鮮明に投影できるプロジェクターの光束について検証した。検証には、最大 10,000lm まで光束を調整できる高性能プロジェクターを使用した。室内照明は現地のトンネル坑内の明るさに近い 30lx 程度に調整し、実際のトンネルの形状と覆工表面の状況を模擬した FRP 製のモックアップに 4.5m の離れで投影した。

図 2.3-4 には、光束が 4,000lm、6,000lm、8,000lm のときの投影状況を示す。この状況を目視確認した結果、プロジェクターの光束は 8,000lm 以上であれば、メッシュ図が鮮明であると判断された。

以上より、最大の拘束を 10,000lm 程度有し、最も広範囲に投影できる超単焦点レンズを有するプロジェクターを選定した。なお、どの程度の明るさや投影範囲が必要かについては、使用者の判断によっても異なるため、本研究では使用するプロジェクターは適宜変更されることも前提として回転台座を設計するとともに、プロジェクターの機能に依存しないメッシュ形状補正ができる仕様とした。

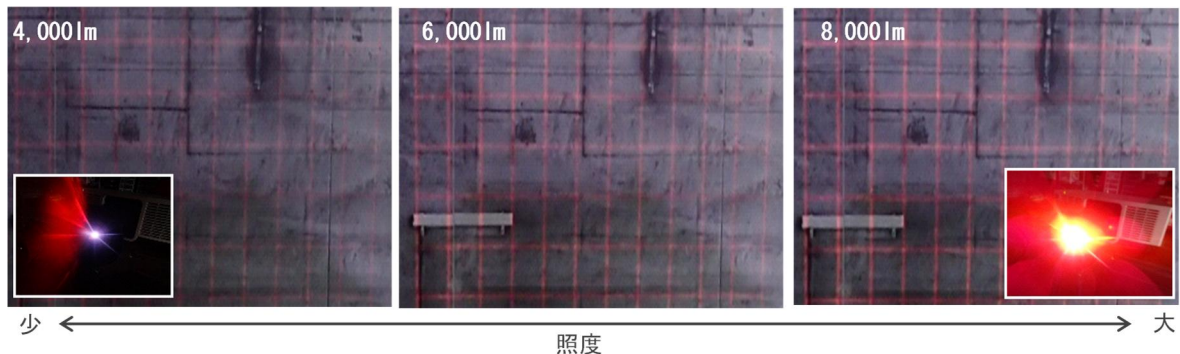


図 2.3-4 光量を変化させた場合の投影の鮮明度の検証

### (2) メッシュ図の補正精度

トンネルの断面形状に応じて、メッシュ図が正しく補正されていることを確認するため、投影したメッシュ図の縦と横の寸法を計測した。この結果、図 2.3-5 のように、寸法差は最大でも 8mm であり、十分な補正精度を有していると考えられた。

### (3) 投影装置の移動精度

投影装置を線路方向に走行させたときのズレを確認するため、投影装置の移動距離計測精度について

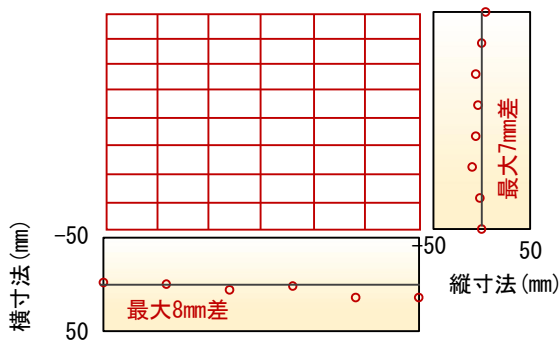


図 2.3-5 形状補正精度

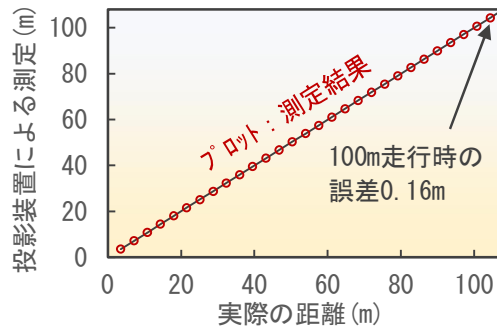


図 2.3-6 移動距離計測精度



図 2.3-7 振動測定状況

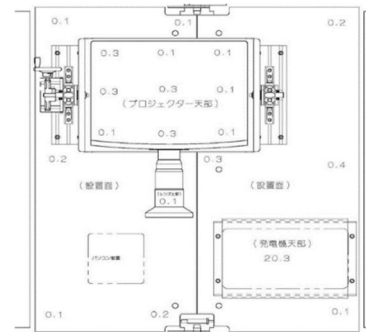


図 2.3-8 振動測定結果

検証した。モックアップに平行に設置した線路上で、合計 100m 移動させたときのロータリーエンコーダの測定誤差を確認した。なお、線路には勾配や曲線を設けておらず、これらの影響は、後述する現地で確認することとした。この結果、図 2.3-6 のように、100m 移動時において表示誤差は 0.16m であった。トンネルでは移動距離の指標となる目地が 10~20m 間隔にあり、キロ程も表示されており、適宜位置の補正を行うことを前提とすると、十分な移動距離計測精度と考えられた。

#### (4) 発電機の防振

投影装置には電源として発電機を搭載している。発電機は振動が大きいため、底面足 4 箇所に弾性材による防振加工した台座を制作した。この性能を確認するため振動測定を実施した。測定状況を図 2.3-7 に、振動試験時の測定結果を図 2.3-8 に示す。発電機上面の振動は 20.3G であるのに対して、プロジェクター上面やレンズ先端で約 0.01G まで低減させており、安定した投影を可能にした。

### 2.3.3 実現場における検証

鉄道事業者が撮影した壁面画像を使用し、事前に机上で変状の自動抽出、要注意箇所の特定制および健全度の判定を実施し、3 夜間にわたり実トンネルで投影した。代表的なトンネル形状である馬蹄形、矩形、円形がすべて存在する区間を選定した。トンネルへの入坑は車両基地からとし、投影区間まではモーターカーの台車に乗せ移動した (図 2.3-9、図 2.3-10)。

車両基地において、回転台座はトロ台車にあらかじめ固定したが、その他は分解した状態で台車に乗せて、投影区間に到着後に組み立てた (図 2.3-11)。現地での組み立てを想定し、投影までに要する時間を測定した結果、10 分以内と短い時間で投影を開始できることが確認できた。

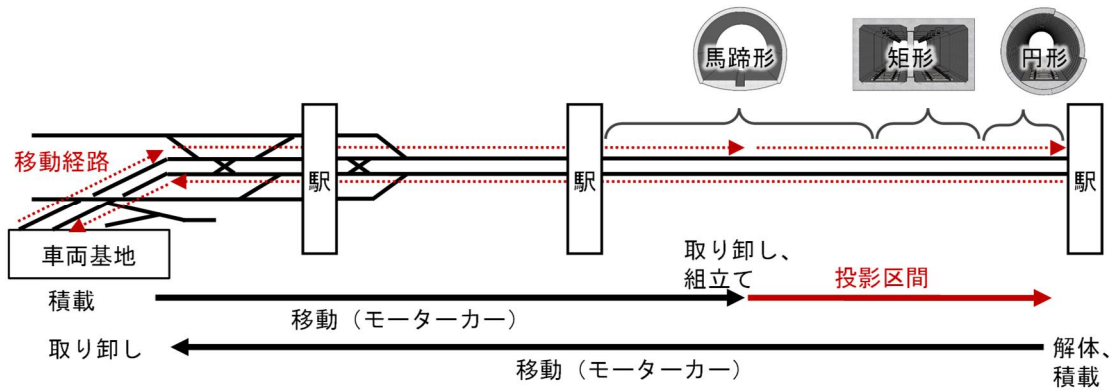


図 2.3-9 実トンネルで実施した投影の流れ



図 2.3-10 車両基地での搭載状況



図 2.3-11 到着後の組み立て

### (1) 走行精度の検証

延長 400m の区間において、投影装置の走行距離の測定精度を検証した。実際の移動距離の測定には、高精度レール距離測定器を用いた (図 2.3-12)。この結果、図 2.3-13 に示すように誤差は 100m あたり 0.18%であった。現地は勾配がきつく、曲線区間も多く存在したため、モックアップを用いた検証に比べて誤差は大きくなった。メッシュ図の 1 マスの 1/4 (25cm) までズレを許容するとすれば 100m に 1 回の補正となる。一般に、夜間の間合いにおけるトンネル内作業は 3 時間程度に限られ、1 晩に検査できる範囲は数百 m 程度である。そのため 1 晩の調整は数回程度に収まるため、実用に問題ない走行精度を有すると考えられた。なお、急こう配区間ではズレが局所的に大きくなる場合も見られた。

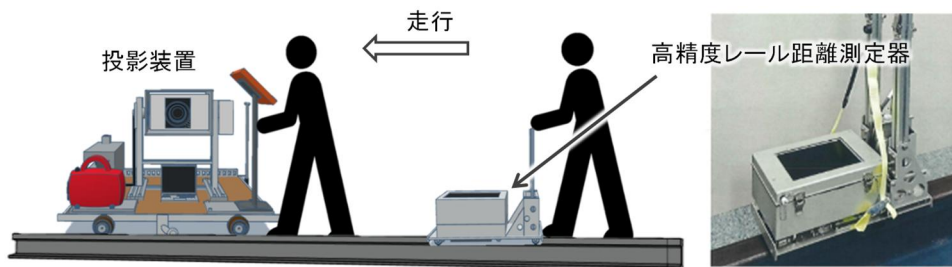
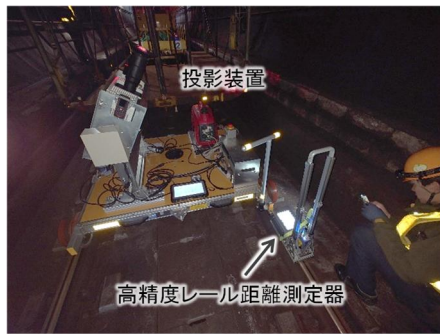
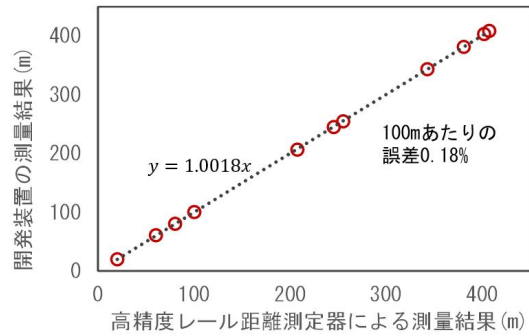


図 2.3-12 移動距離の検証方法



(a) 検証状況



(b) 実測値との比較結果

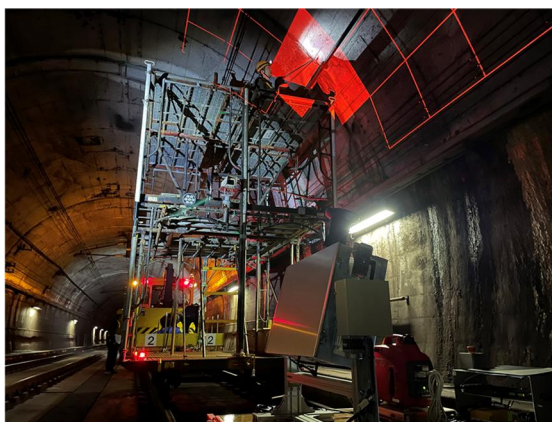
図 2.3-13 移動距離の検証

前述したように、現状の移動距離測定装置は簡便なものとしており、ある程度調整しながら走行することを前提としている。しかしながら、将来的には調整が不要となるのがよいと考えており、今後は高所作業車などにも搭載できるようマルチマウント化を進める。この際に、今回の検証に用いたような、既存の高精度のレール距離測定器との連動の切り替えも容易にできるよう、改良していく予定である。

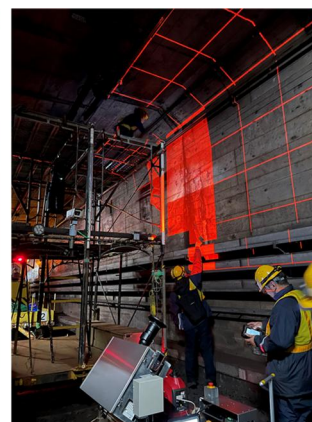
## (2) 検査検証

実トンネルにおける検査の検証として、異なる断面形状で投影しながら高所作業車上で近接目視および打音を実施している状況を図 2.3-14 に示す。また図 2.3-15 には、高所作業車上から撮影した要注意箇所を示す。馬蹄形、円形および矩形のトンネルで投影を行ったが、形状に合わせて投影でき、高所作業車上の壁面にも投影できていることがわかる。なお、図 2.3-16 は凹凸のあるダクトイルセグメントに投影した状況であり、簡易に凹部を 1m 間隔でつらねた形状で断面形状を入力したが、検査に支障がない程度に投影できることを確認した。

また、従来検査と投影装置を用いた検査に要する時間の比較を 10m 区間で実施した。従来検査では、モーターカーの運転手が高所作業車を少し移動させ、高所作業車上の作業員が全面打音した。一方、投影装置を用いた検査では、モーターカーの運転手は高所作業車を要注意箇所の位置まで移動させたあと、高所作業車上の作業員は赤く塗りつぶされた箇所のみ打音することとした。馬蹄形トンネル、矩形トンネルにてこの検証を実施し、投影装置を用いることで検査速度が約 2 倍に向上する結果が得られた。



(a) 馬蹄形トンネル



(b) 矩形トンネル

図 2.3-14 検証結果

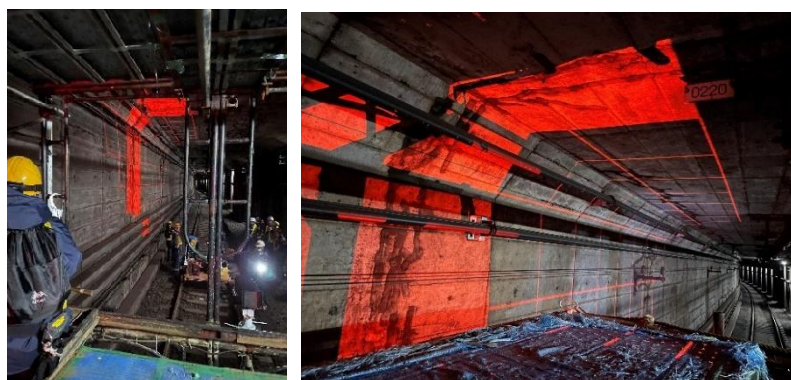


図 2.3-15 高所作業車上方への投影状況



図 2.3-16 凹凸部

### 3. 結論

本研究では、鉄道トンネルの定期検査業務の高速化と省力化を図るため、2つのデジタル技術を開発した。得られた主な成果を以下にまとめる。

#### (1) 健全度自動判定システムの開発

トンネルの壁面画像からAIで変状を抽出して、現地で直接確認すべき要注意箇所を特定するとともに、指定区間毎のトンネルの健全度を判定できるアプリケーションを開発した。鉄道事業者の検査台帳との比較から、画像上の変状を90%以上の精度で抽出できること、要注意箇所の現地確認前に、地下路線全体の健全度のトレンドを捉えられることを確認している。現状は、画像上への変状の書き込みをはじめとする検査台帳の作成は全て人手に頼っている。システムを用いることで、人の作業はシステムが出力した結果の確認と修正のみになるため、業務の高速化と省力化が期待できる。

#### (2) 覆工投影装置の開発

要注意箇所を赤く塗りつぶした1m四方のメッシュを投影できる、移動式のプロジェクションマッピング装置を開発した。壁面画像の確認からもトンネルの健全度はある程度想定することができるが、これを確定するためには、現地での目視確認が必要になる。現状、注視すべき要注意箇所の現地照合は紙資料で行うことが一般的である。システムを用いることで、現地照合が容易になり、検査速度が2倍に向上する結果が得られた。

今後は、開発したシステムの運用を開始する。合わせて、健全度自動判定システムについては、教師データを適宜追加しながらバージョンアップを図り、要注意箇所投影システムについては、高所作業車などにも搭載できるようマルチマウント化を施す計画である。

### 4. 知的財産権取得状況

特許出願 1件 (出願中)

発明の名称：トンネル健全度判定装置及び点検支援システム

## 5. 研究成果発表実績

### 1) 論文発表

国内 2件、海外 1件

- [1] 大原勇, 仲山貴司: ディープラーニングを用いた開削トンネルの健全度自動判定の試行, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会, 2022.9
- [2] Yu Ohara, Takashi Nakayama, Akihiko Miwa and Kazuhide Yashiro: Study on the Digitalization of Tunnel Inspection Using Deep Learning, World Tunnel Congress 2023, May 2023, Athens, Greece
- [3] 清水達貴, 仲山貴司, 三輪陽彦, 大原勇, 石井貴大, 野城一栄: トンネル検査時要注意箇所投影装置の開発, 土木学会トンネル工学論文集, Vol.33, IV-2, 2023.11

### 2) 口頭発表

国内 2件、海外 0件

- [1] 大原勇, 仲山貴司: ディープラーニングを用いた開削トンネルの健全度自動判定の試行, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会, 2022.9
- [2] 清水達貴, 野城一栄, 仲山貴司, 三輪陽彦, 石井貴大: トンネル検査時要注意箇所投影装置の製作・検証, 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会, 2023.9

## 6. 参考文献

- 1) 公益財団法人鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編) トンネル、丸善出版、2019.
- 2) HP(<https://www.fujifilm.com/jp/ja/business/inspection/infraservice/hibimikke/features>)
- 3) HP(<https://cweb.canon.jp/imaging-solutions/lineup/inspection-eye/defect-detection>)