

AI を活用した道路橋メンテナンスの効率化
に関する共同研究報告書(Ⅲ-3)
ートンネル点検・診断支援技術ー

令和 4 年 6 月

AI を活用した道路橋メンテナンスの効率化に関する共同研究
点検 AI(画像解析)開発グループ

Copyright © (2022) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

AI を活用した道路橋メンテナンスの効率化 に関する共同研究報告書(Ⅲ-3)

－トンネル点検・診断支援技術－

AI を活用した道路橋メンテナンスの効率化に関する共同研究
点検 AI (画像解析) 開発グループ

要旨

「AI を活用した道路橋メンテナンスの効率化に関する共同研究」(平成 30～令和 3 年度)の点検 AI (画像解析) 開発グループでは、安全かつ効率的な点検を推進するうえで、変状等の情報取得支援のための点検ロボットや、取得された点検の情報を立体的に把握するための 3 次元モデル、記録された変状等の大量な画像等の情報を効率的に整理することが可能な点検 AI の活用、点検時に取得された情報のデータ格納に向けた取り組みを進めた。

Ⅲ-1 では、点検時の支援技術となる点検ロボット・AI や点検データ格納の必要性や活用シーンについて述べる。

Ⅲ-2 では、活用シーンに基づき進められてきた共同研究者の研究開発結果となる開発技術を述べる。

本資料Ⅲ-3 では、トンネル点検手法及び診断への支援技術及び点検・診断によって取得されたデータの格納及びその活用について、現場での適用を想定した解説を述べる。

キーワード：点検ロボット，点検 AI，支援技術，変状情報，活用シーン

AI を活用した道路橋メンテナンスの効率化に関する共同研
究
平成 30～令和 3 年度
参加者一覧

国立研究開発法人土木研究所 a, b, c
アジア航測株式会社 a, b, c
アジア航測株式会社・株式会社イクシス c・富士電機株式会社 b, c
茨城県 b
株式会社エイト日本技術開発 a, c
一般財団法人橋梁調査会 a, c
Global Walkers 株式会社 c
首都高技術株式会社 c
一般財団法人首都高速道路技術センター a, c
大日本コンサルタント株式会社 a, b, c
株式会社デンソー c・株式会社岩崎 c
富山市 b
ニチレキ株式会社 b
株式会社日本海コンサルタント a, c
日本工営株式会社 a, c
日本無線株式会社 b
株式会社ニュージェック a, c
パシフィックコンサルタンツ株式会社 a, c
株式会社日立製作所 a, c
株式会社福山コンサルタント a, c
株式会社復建技術コンサルタント b
富士通株式会社 a, c
株式会社まざらん a
三菱電機株式会社 a, c
八千代エンジニアリング株式会社 a, c
国立研究開発法人理化学研究所 c

注) a～c は、次のとおり、所属する開発グループを示す。

a: 診断 AI 開発グループ, b: 点検 AI (床版の土砂化等) 開発グループ
c: 点検 AI (画像解析) 開発グループ

参加者名簿

令和4年3月31日現在

国立研究開発法人 土木研究所	構造物メンテナンス研究センター	西川 和廣	H30.9～
〃	〃	金澤 文彦	H30.9～
〃	構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ	星隈 順一	R3.7～
〃	〃	桐山 孝晴	H30.9～
〃	〃	石田 雅博	H30.9～
〃	〃	大住 道生	H30.9～
〃	〃	澤田 守	H30.9～
〃	〃	上仙 靖	H30.9～
〃	〃	田中 良樹	H30.9～
〃	〃	大島 義信	H30.9～R2.3
〃	〃	廣江 亜紀子	H30.9～R2.3
〃	〃	森本 智弘	H30.9～H31.3
〃	〃	松本 直士	H30.9～R2.3
〃	〃	遠藤 正史	H30.9～R2.3
〃	〃	野田 翼	H30.9～R2.5
〃	〃	塚崎 翔太	H31.4～R3.3
〃	〃	余野 智哉	H31.4～R2.6
〃	〃	二宮 智大	H31.4～R2.7
〃	〃	増田 隆宏	H31.4～R2.7
〃	〃	中浦 慎之介	H31.4～R3.4
〃	〃	堀内 智司	H31.4～
〃	〃	坂本 佳也	H31.4～
〃	〃	吉田 英二	H31.4～
〃	〃	江口 康平	H31.4～
〃	〃	小野 健太	H31.4～
〃	〃	大西 孝典	H31.7～R3.9
〃	〃	藤木 裕二	R2.4～
〃	〃	夏堀 格	R2.4～
〃	〃	岩谷 祐太	R2.7～
〃	〃	菅原 達也	R2.7～
〃	〃	行藤 晋也	R2.8～
〃	〃	竹内 彩	R3.4～
〃	〃	佐藤 純弥	R3.4～
〃	〃	大西 達也	R3.10～
〃	技術推進本部先端技術チーム	新田 恭士	H30.9～R2.3
〃	〃	森川 博邦	R2.4～
〃	〃	田中 洋一	H30.9～H31.3
〃	〃	服部 達也	H31.4～R3.3
〃	〃	茂木 正晴	R3.4～
〃	〃	山内 元貴	H30.9～
〃	〃	下川 光治	H30.10～R3.3
〃	〃	榎本 真美	H30.10～R3.3
〃	〃	二宮 建	H31.4～
〃	先端材料資源研究センター材料資源研究グループ	古賀 裕久	H30.9～
〃	〃	中村 英佑	H30.9～H31.6
〃	〃	櫻庭 浩樹	H30.9～
〃	〃	加藤 祐哉	H30.9～H31.6
〃	〃	小沢 拓弥	R2.4～
〃	〃	小田部 貴憲	H31.4～R3.3
〃	〃	角田 貴也	R3.7～
〃	地質・地盤研究グループ	尾西 恭亮	H30.9～
アジア航測株式会社	社会インフラマネジメント事業部	山田 晴利	H30.9～
〃	社会インフラマネジメント事業部事業推進室	長尾 孝幸	H30.9～
〃	社会インフラマネジメント事業部社会インフラ技術部社	藤ヶ崎 聡	H30.9～
〃	会インフラ技術二課	高 恒	H30.12～
〃	〃	高野 裕司	H30.9～
〃	社会インフラマネジメント事業部 PPP/PFI 推進室		

アジア航測株式会社	社会インフラマネジメント事業部東北インフラ技術部	青柳 健二	H30.9～
〃	社会インフラマネジメント事業部中部インフラ技術部	森 淳二郎	H30.12～
〃	社会インフラマネジメント事業部中部インフラ技術部社	中川 善士郎	H30.12～
〃	会インフラ技術一課		
〃	社会基盤システム開発センター	水上 幸治	R2.4～
〃	社会基盤システム開発センター先端技術研究所計測技	下川 光治	R3.4～
〃	術研究所		
〃	事業統括部事業戦略部道路プロジェクト	松井 晋	H30.9～
〃	事業統括部事業戦略部技術戦略室	中澤 明寛	H30.9～
〃	〃	佐野 実可子	H30.9～
株式会社イクシス	Technology Div. AI & DataService Team	山崎 一也	H30.9～
〃	代表取締役	山崎 文敬	H30.9～
〃	Technology Div. R&D Team	中山 錬	H30.9～
〃	Technology Div. Product Team	阿部 翔太朗	H30.9～
〃	Technology Div. R&D Team	野田 道広	H30.9～R3.8
〃	Technology Div. AI & DataService Team	乾 文雄	H30.9～R2.8
〃	〃	友正 常雄	H30.9～R2.8
〃	〃	菅野 廣一郎	H30.9～R3.8
富士電機株式会社	営業本部営業統括室セールスプロモーション部	笛木 豊	H30.9～
〃	〃	大賀 英治	H30.9～
〃	技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術研究セ	矢尾 博信	H31.4～
〃	ンターセンシング技術研究部		
〃	〃	工藤 高裕	H30.9～
〃	〃	仲村 慎吾	H31.4～
〃	技術開発本部デジタルイノベーション研究所 AI ソ	浅野 貴正	H30.9～
〃	リューションセンターAI 研究部		
〃	〃	竹内 豊	H30.9～
〃	技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術研究セ	土井 達也	H31.4～R2.3
〃	ンター電気エネルギー技術研究部		
茨城県	土木部道路維持課	石川 昭	H30.9～H31.3
〃	〃	長山 公信	H31.4～R2.3
〃	〃	柏崎 元治	R2.4～
〃	〃	大塚 将司	R3.4～
〃	〃	坂本 裕司	H30.9～H31.3
〃	〃	大和田 康文	H30.9～H31.3
〃	〃	笠森 裕史	H31.4～R3.3
〃	〃	深谷 健	R31.4～R2.3
〃	〃	鴨志田 龍	R2.4～
株式会社	インフラ保全事業部 中部支社	美藤 友郎	H30.9～
エイト日本技術開発	インフラ保全事業部 東京支社	松本 直樹	H30.9～
〃	〃	松村 翔	H30.9～
〃	インフラ保全事業部	則竹 義辰	H30.9～
〃	〃	小野 裕一	R2.8～
〃	インフラ保全事業部 中国支社	菖蒲迫 正之	H30.9～
〃	〃	高木 正行	H30.9～
一般財団法人	調査部	山本 和利	H30.9～
橋梁調査会	企画部	平安山 良和	H30.9～R2.3
〃	〃	石井 豊	H30.9～
Global Walkers	取締役 CTO	樋口 未来	H30.9～
株式会社			
首都高技術株式会社	技師長	永田 佳文	H30.9～R3.2
〃	構造管理部東京西管理課	遠藤 重紀	R1.4～
〃	構造管理部東京東管理課	布施 光弘	H30.9～
〃	〃	白石 有佳	R2.4～
〃	〃	新村 祐一	R2.4～
〃	〃	富田 大樹	R2.4～
〃	構造管理部神奈川管理課	金子 英樹	R2.4～
〃	インフラデジタル部インフラパトロール課	紺野 康二	H30.9～
〃	〃	高野 淳	R1.9～

一般財団法人	審議役	八崎 弘昌	H30.9～
首都高速道路技術センター	〃	眞仁田 裕	H30.9～
〃	〃	田嶋 仁志	H30.9～R2.6
〃	〃	御嶽 讓	R2.7～
〃	構造技術部コンクリート構造技術課	佐藤 祐輔	H30.9～
〃	〃	山田 将憲	H30.9～
〃	情報技術部土木情報技術課	繪鳩 武史	H30.9～
〃	構造技術研究所第一構造研究開発室	青木 聡	H30.9～
〃	構造技術研究所第二構造研究開発室	張 広鋒	H30.9～
〃	デジタル・イノベーション研究所第一 DI 研究開発室	小原 誠	H30.9～
〃	デジタル・イノベーション研究所第二 DI 研究開発室	日ヶ丸 幸俊	H30.9～R3.9
大日本コンサルタント	インフラ技術研究所	平山 博	H30.9～
株式会社	インフラ技術研究所技術開発部	横山 広	H30.9～
〃	インフラ技術研究所技術開発部保全エンジニアリング研究室	牧 祐之	H30.9～
〃	〃	小林 大	H30.9～
〃	インフラ技術研究所技術開発部 ICT ソリューション室	龍田 斉	H30.9～
株式会社デンソー	まちづくりシステム開発部 UAV ソリューション事業推進室	河内山 聡	H30.9～R3.3
〃	〃	加藤 直也	H30.9～
〃	〃	山崎 浩二	H30.9～R3.3
〃	〃	吉川 寛	R2.4～
〃	〃	光田 徹治	R2.4～
〃	〃	大杉 拓也	R3.9～
株式会社岩崎	企画開発部	後藤 紫郁	H30.9～
〃	〃	真柄 毅	H30.9～H31.1
〃	〃	山本 紀彦	H30.9～
〃	〃	村瀬 翔吾	H30.9～H31.1
〃	〃	河井 大地	H30.9～
富山市	政策参与	植野 芳彦	H30.9～
〃	建設部道路保全対策課	杉谷 真司	H30.9～R3.3
〃	〃	宇津 徳浩	H30.9～R3.3
〃	〃	黒崎 智治	R2.4～
〃	〃	酒井 陽介	R3.4～
〃	〃	藤田 博樹	R3.4～
ニチレキ株式会社	道路エンジニアリング部調査課	那珂 通大	H30.9～
〃	中部支店技術課	永塚 竜也	H30.9～R1.9
〃	道路エンジニアリング部調査課	佐藤 和久	H30.9～
株式会社	常務取締役	喜多 敏春	H30.9～
日本海コンサルタント	道路事業本部 兼 AI技術室	安藤 正幸	H30.9～
〃	技術事業本部 保全技術部	浦田 孔二	H30.9～
〃	社会事業本部 計画研究室 兼 AI技術室	塩土 圭介	H30.9～
〃	技術事業本部 プロジェクト 兼 AI技術室	多田 徳夫	H30.9～
〃	社会事業本部 計画研究室 兼 AI技術室	眞島 俊光	H30.9～R3.3
〃	道路事業本部 道路交通部 兼 AI技術室	形屋 陽一郎	H30.9～
〃	技術事業本部 構造設計部 兼 AI技術室	末松 雅隆	H30.9～R3.3
〃	〃	町口 敦志	H30.9～
〃	技術事業本部 プロジェクト 兼 AI技術室	中谷 明弘	H30.9～
日本工営株式会社	鉄道事業部	藤原 鉄朗	H30.9～
〃	道路事業部道路インフラマネジメント部	松山 公年	H30.9～
〃	〃	新聞 友祐	H30.9～
〃	中央研究所事業創生センター	中津井 邦喜	H30.9～
〃	中央研究所先端研究センター	中野 雅章	H30.9～R1.12
〃	〃	古木 宏和	R2.1～
〃	札幌支店技術第一部	秋山 成央	H30.9～
〃	社会システム事業部統合情報技術部	沼田 祐助	R1.4～
〃	道路事業部道路インフラマネジメント部	渡邊 大智	R2.4～
日本無線株式会社	ソリューション事業部事業企画開発部	南方 秀之	H30.9～
〃	交通インフラ技術部道路情報システムグループ	土屋 功	R2.4～
〃	〃	増田 亮	H30.9～
〃	技術開発本部研究開発部新領域開発グループ	島田 尚	H30.9～
〃	〃	大西 喬之	H31.4～

日本無線株式会社	技術開発本部研究開発部新領域開発グループ	轟 勇人	R2.4～
株式会社ニュージェット	国内技術本部交通・都市部門 道路グループ	白 星保	H30.10～
〃	国内技術本部交通・都市部門 道路グループ 橋梁チーム	入倉 雅人	H30.10～
〃	〃	橋本 欣也	H30.10～
パシフィックコンサルタンツ株式会社	交通基盤事業本部インフラマネジメント部橋梁保全室	中澤 治郎	H30.9～
〃	交通基盤事業本部	安田 亨	H30.9～
〃	交通基盤事業本部インフラマネジメント部橋梁保全室	森 康晴	H30.9～
〃	〃	芳賀 堯	H30.9～
〃	交通基盤事業本部インフラマネジメント部インフラ経営室	福澤 伸彦	H30.9～
〃	〃	仁野 元太	H30.9～R2.3
〃	交通基盤事業本部インフラマネジメント部トンネル室	重田 佳幸	H30.9～
〃	〃	山本 秀樹	H30.9～
〃	交通基盤事業本部インフラマネジメント部橋梁保全室	樋口 裕治	H30.9～
〃	交通基盤事業本部インフラマネジメント部インフラ経営室	田中 伸幸	H30.9～
〃	DS 事業本部情報事業部	川城 研吾	H30.9～
〃	〃	榎本 真美	R3.4～
株式会社日立製作所	環境事業部情報システムエンジニアリング部	古山 昇児	H30.9～
〃	〃	宮崎 剛	H30.9～
〃	〃	佐藤 啓香	H30.9～
〃	〃	田中 俊和	R2.4～
〃	社会イノベーション事業推進本部サステイナブルインフラマネジメント部	柿本 真吾	H30.9～
〃	〃	増田 真也	H30.9～R2.3
〃	社会ソリューション第一営業本部 営業第一部	中村 有輝	H30.9～
株式会社	インフラマネジメント事業部	宮村 正樹	H30.9～
福山コンサルタント	〃	青島 亘佐	H30.9～
〃	〃	徳永 皓平	H30.9～
株式会社	構造技術部東京技術一課	唐木 正史	H30.9～
復建技術コンサルタント	〃	石川 雄貴	H30.9～
〃	〃	塚本 美咲	R3.4～
富士通株式会社	社会システム事業本部 防災システム事業部	田嶋 聡司	H30.9～
〃	〃	早川 誠	R1.7～
〃	〃	長谷川 英司	R3.1～
〃	〃	立脇 正敬	R3.1～
〃	〃	荒川 博史	H30.9～R3.9
〃	〃	菊地 英幸	H30.9～
〃	研究本部 先端融合技術研究所	渡部 勇	H30.9～
〃	デジタルフロント事業本部 デジタルビジネス事業部	長谷 一也	H30.9～R1.7
〃	ビジネストランスフォーメーション推進室	根岸 仁	H30.9～R1.7
〃	デジタルフロント事業本部 デジタルイノベーター推進統括部	長澤 卓也	H30.9～R1.7
〃	〃	塚田 真希	H30.9～R2.3
株式会社まざらん	取締役	西垣 重臣	H30.9～R3.12
三菱電機株式会社	神戸製作所社会システム基盤技術部	中田 雅文	H30.9～
〃	情報技術総合研究所知能情報処理技術部知能情報応用技術グループ	松田 幸成	H30.9～R2.3
〃	先端技術総合研究所機械システム技術部構造強度信頼性グループ	葉名 紀彦	H30.9～R2.3
〃	社会環境事業部社会システム第二部	細野 秀人	R2.4～
〃	神戸製作所社会システム基盤技術部	佐久嶋 拓	R2.4～
〃	〃	眞鍋 七海	R2.4～
株式会社	事業開発本部第三開発室	中島 道浩	H30.9～
八千代エンジニアリング	事業統括本部国内事業部インフラマネジメント部	野田 一弘	H30.9～
〃	〃	関口 斉治	H30.9～
〃	技術開発研究所 AI 解析研究室	安野 貴人	H30.9～
国立研究開発法人	革新知能統合研究センターインフラロボット管理チーム	岡谷 貴之	H30.9～
理化学研究所	〃	大野 和則	H30.9～
〃	〃	岡田 佳都	H30.9～
〃	〃	菅沼 雅徳	H30.9～

注) 期間は本共同研究における担当期間を示す。H: 平成, R: 令和

目次

1	はじめに.....	1.1
1.1	研究の目的.....	1.1
1.2	共同研究体制.....	1.2
1.3	各グループの研究概要.....	1.3
1.3.1	診断 AI 開発グループの研究概要.....	1.3
1.3.2	点検 AI（床版の土砂化等）開発グループの研究概要.....	1.4
1.3.3	点検 AI（画像解析）開発グループの研究概要.....	1.5
1.4	本共同研究報告書の位置づけと構成.....	1.6
2	総論.....	2.1
2.1	本研究の要旨.....	2.1
2.2	トンネル点検・診断の実態と課題.....	2.1
2.3	研究の目的と範囲.....	2.3
2.4	トンネル点検・診断の今後の望ましい方向性.....	2.4
2.4.1	従来点検に対する位置づけ.....	2.4
2.4.2	目指すべき方向性.....	2.5
3	点検ロボットによるトンネル点検手法.....	3.1
3.1	点検ロボットの必要性.....	3.1
3.1.1	現況の課題に対する解決策.....	3.1
3.1.2	求められる用途・技術.....	3.2
3.2	点検ロボットに求められる機能・性能.....	3.4
3.2.1	画像技術.....	3.4
3.2.2	計測・モニタリング技術.....	3.4
3.3	点検ロボットの活用シーン.....	3.5
3.4	走行型トンネル点検システム 手法 1.....	3.7
3.4.1	概要.....	3.7
3.4.2	機能.....	3.14
3.4.3	茨城県フィールド実証.....	3.49
3.5	走行型トンネル点検システム 手法 2.....	3.86
3.5.1	概要.....	3.86
3.5.2	機能.....	3.87
3.5.3	茨城県フィールド実証.....	3.93
4	点検・診断支援技術.....	4.1
4.1	変状抽出手法.....	4.1
4.1.1	点検 AI の活用.....	4.1
4.1.2	教師データの作成と整備.....	4.7
4.1.3	活用シーンに応じた点検 AI 性能評価手法.....	4.20
4.1.4	画像解析技術を活用したひび割れの評価結果.....	4.25

4.1.5	評価結果の総括と今後に向けて	4.45
4.2	診断支援手法	4.46
4.2.1	診断 AI の活用	4.46
4.2.2	外力性診断 AI	4.51
5	点検データ格納	5.1
5.1	データ格納の現状	5.1
5.1.1	現状の点検データ	5.1
5.1.2	ヒアリング結果に基づくデータ管理のあり方	5.9
5.2	トンネル点検データ管理システムの要件	5.10
5.2.1	機能要件	5.12
5.2.2	非機能要件	5.13
5.2.3	実現のために必要となるデータ	5.14
5.3	データ格納要件	5.15
5.3.1	現状の点検データの分析	5.15
5.3.2	格納対象データ	5.18
5.3.3	格納方法	5.22
5.4	点検データの活用	5.25
5.4.1	3次元形状モデルの詳細度	5.25
5.4.2	損傷と3次元モデルの関連付け・表示	5.26
5.4.3	点検結果表示	5.27
5.4.4	補修履歴データ表示	5.28
5.4.5	他システムへのデータ提供	5.29
5.5	点検データの正規化	5.29
5.5.1	正規化と関連性	5.29
5.5.2	正規化に伴い期待される効果	5.31
6	まとめ	6.1
	謝辞	6.3

1 はじめに

1.1 研究の目的

近年，社会インフラの老朽化が問題となる一方で，維持管理コストの増加や橋梁に関する専門知識を持った熟練技術者の減少などの問題が顕在化している．そのため，点検や診断の支援など，橋梁維持管理の信頼性向上を実現する技術開発が必要とされており，その解決策の一つとして AI（Artificial Intelligence）技術に着目して，メンテナンスサイクルにおける点検・診断・措置の信頼性向上を目指し，研究開発に取り組んだ．

このような背景から，本共同研究は，診断のために必要な知識と技能を有する技術者が不足する地方公共団体における診断業務を支援するための診断支援技術（診断 AI）の開発，RC床版の土砂化の予防保全のための非破壊検査技術と AI による機械学習を用いた点検支援技術（点検 AI（床版の土砂化等））の開発，及び UAV（Unmanned Aerial Vehicle）等を用いて取得した変状情報などの点検記録を画像解析により効率的に整理することができる点検支援技術（点検 AI（画像解析））の開発を目的としている．

共同研究発足時の第 1 回全体会議の状況を写真 1-1 に示す．



写真 1-1 第 1 回全体会議（平成 30 年 10 月）

1.2 共同研究体制

本共同研究は、診断 AI 開発グループ、点検 AI（床版の土砂化等）開発グループ、点検 AI（画像解析）開発グループの 3 つのグループに分かれて、平成 30 年度から令和 3 年度の間、それぞれの研究に取り組んだ（図 1-1）。茨城県と富山市は、道路管理者として現場のニーズを提供すること及び現地調査等の際のフィールドを提供することを目的に、各グループの研究に参加した。

診断 AI 開発グループと点検 AI（床版の土砂化等）開発グループは、構成事業者を一部変更した上で、令和 5 年度まで共同研究を延長し、引き続き、それぞれの研究に取り組んでいる。

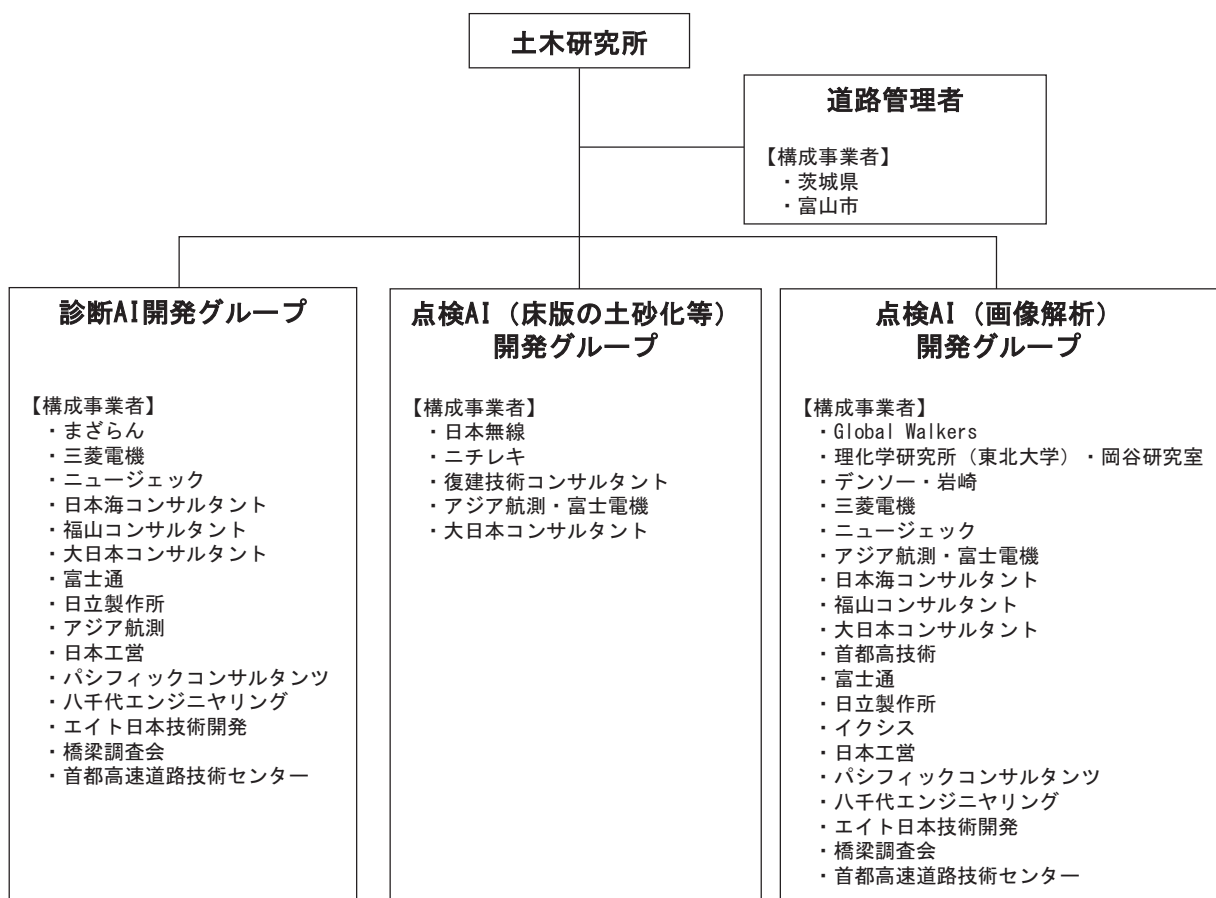


図 1-1 共同研究体制（平成 30 年度～令和 3 年度）

1.3 各グループの研究概要

1.3.1 診断 AI 開発グループの研究概要

診断 AI 開発グループでは、メンテナンスサイクルをより実効性のあるものとするため、特に技術力を要する診断の信頼性を向上させることを目的として、共同研究参加者及び招へい研究員が有する診断における知識や思考方法を基にした AI を活用した橋梁診断支援 AI システム（以下、「診断 AI システム」という。）の開発に取り組んだ¹⁾。診断 AI システムとは、橋梁の台帳情報や点検情報等を入力することで、対象となる橋梁の診断結果とその理由及び措置方針を提示するシステムである（写真 1-2、図 1-2）。

診断では、その診断結果に至った具体的な説明が求められることから、診断 AI システムの AI にはエキスパートシステムを採用している。共同研究参加者及び招へい研究員と議論（写真 1-3）を行いながら、診断における知識や思考方法をフローチャート化した診断のロジックを作成し、それを順次システム化することで、令和 3 年度には、対応可能な症例は限定されているものの、橋種の約 9 割を対象とする診断 AI システム Ver.1.0 を構築した。



写真 1-2 診断 AI システムの使用状況



図 1-2 診断結果出力画面の例



写真 1-3 共同研究参加者及び招へい研究員で構成される検討会

1.3.2 点検 AI（床版の土砂化等）開発グループの研究概要

点検 AI（床版の土砂化等）開発グループでは、床版の土砂化という損傷に対して、予防保全を可能とするための非破壊検査技術に関する研究に取り組んだ。床版の土砂化は、床版上面に生じる損傷であり、従来の橋梁下面からの目視点検では、損傷が進行するまで発見が難しく、予防保全的な対応が困難である。その土砂化の発生原因は、舗装の下に入った水と輪荷重の影響によるものと考えられているため、舗装の下の滞水の有無を確認できる技術が必要となる²⁾。

そこで、実橋や模型供試体を対象に、各種非破壊検査技術（写真 1-4～1-8）を用いた舗装下の滞水検知の適用性の確認を行った。特に、電磁波レーダを用いた手法では、床版上面に滞水がある場合とない場合を比較すると、比誘電率の違いにより滞水がある場合の方が反射波の振幅が大きくなる特徴を利用して滞水の有無を判断可能であることを確認した。また、AI による機械学習を用いて、電磁波レーダの計測結果から床版上面の滞水を自動推定する学習モデルを構築した。

なお、この研究は、内閣府の「官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）」を活用しながら進めたものである。



写真 1-4 ハンディ式
電磁波レーダ



写真 1-5 カート式
電磁波レーダ



写真 1-6 超音波探査



写真 1-7 車載式電磁波レーダ



写真 1-8 MMS(Mobile Mapping System)
計測

1.3.3 点検 AI（画像解析）開発グループの研究概要

点検 AI（画像解析）開発グループでは、安全かつ効率的な橋梁点検を遂行するための支援技術に関する研究に取り組んだ。道路橋の点検時に効率的な変状等の取得を行ううえで、点検技術者への安全確保や足場・交通規制、取得された点検情報の整理について合理化・省人化を図るための点検支援技術（図 1-3）が求められる³⁾。

そこで、安全かつ効率的な点検や診断で必要となる情報の取得、将来の計画的な維持管理に必要となる情報の効率的な取得の支援を目的とし、UAV（Unmanned Aerial Vehicle）等の点検ロボットによる点検支援技術、取得された情報を立体的・直感的に把握するための 3次元モデルの活用、床版等の広範囲に発生するひびわれや漏水・遊離石灰等の変状情報等を効率的に整理するための点検 AI(画像解析)、取得された変状等の情報の効率的なデータ格納技術について研究開発を進めた。

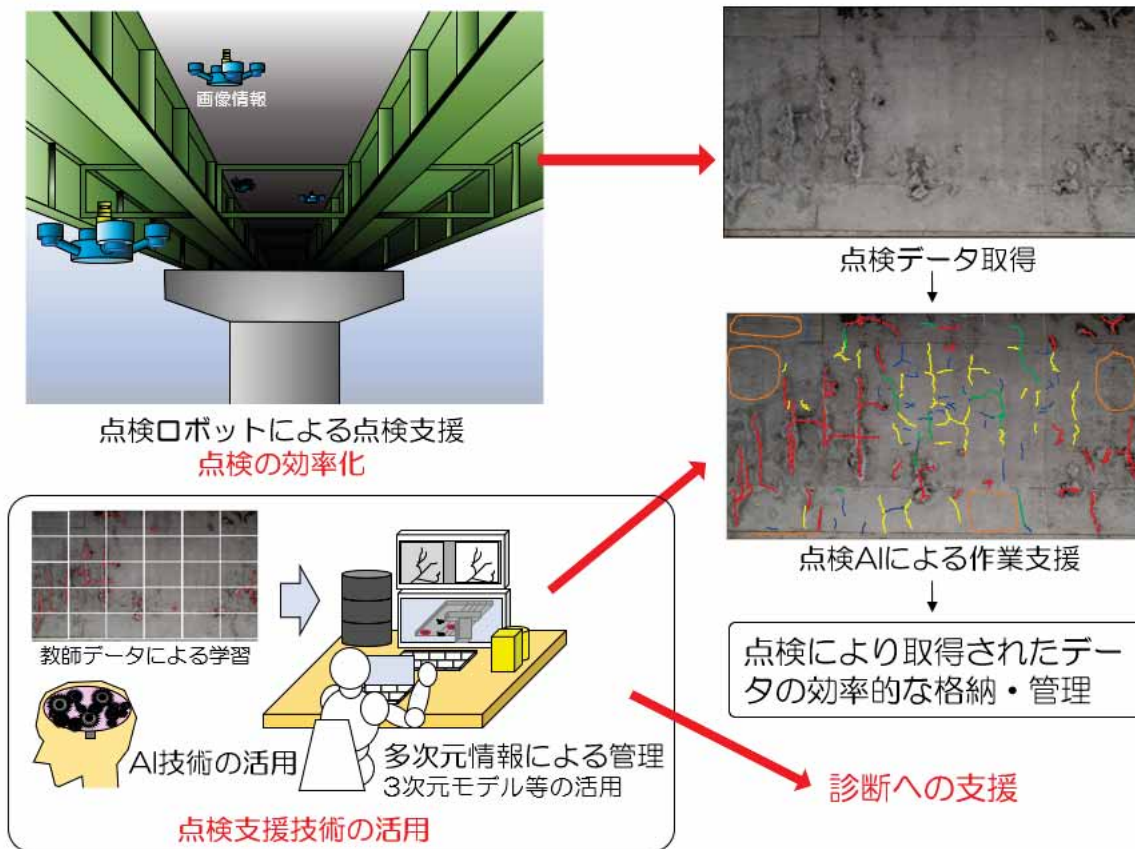


図 1-3 点検ロボット及び画像解析技術の活用による点検支援技術のイメージ

1.4 本共同研究報告書の位置づけと構成

本共同研究報告書は、点検 AI（画像解析）開発グループにおいて、平成 30 年度から令和 3 年度までに取り組んだ点検支援技術に関する研究成果をまとめたものである。

本共同研究は、従来の点検を効率的・効果的に実施するための支援技術等の現場適用を目的としたものである。したがって、本共同研究報告書で述べる内容は、今後、現場での点検を計画・実施するうえでの参考資料とされたい。

本共同研究報告書の構成は、図 1-4 に示すように 3 編構成としている。

Ⅲ-1 では、橋梁点検を実施するうえで必要とされる支援技術の考え方を述べている。橋梁点検時におけるアプローチ及び情報取得の支援技術となる点検ロボット、点検時に取得された情報に基づく 3 次元モデル化、取得された画像情報整理の支援に活用する点検 AI、点検データの格納手法について解説している。

Ⅲ-2 は、共同研究者によって研究開発された点検ロボットや点検 AI といった支援技術について現場での適用を想定し、活用シーンに応じた解説を述べている。

本編Ⅲ-3 では、トンネル点検手法及び診断への支援技術及び点検・診断によって取得されたデータの格納及びその活用について、現場での適用を想定した解説を述べている。なお、トンネル点検・診断支援技術の共同研究は、国立研究開発法人土木研究所技術推進本部先端技術チーム、パシフィックコンサルタンツ(株)、三菱電機(株)によって進めた。

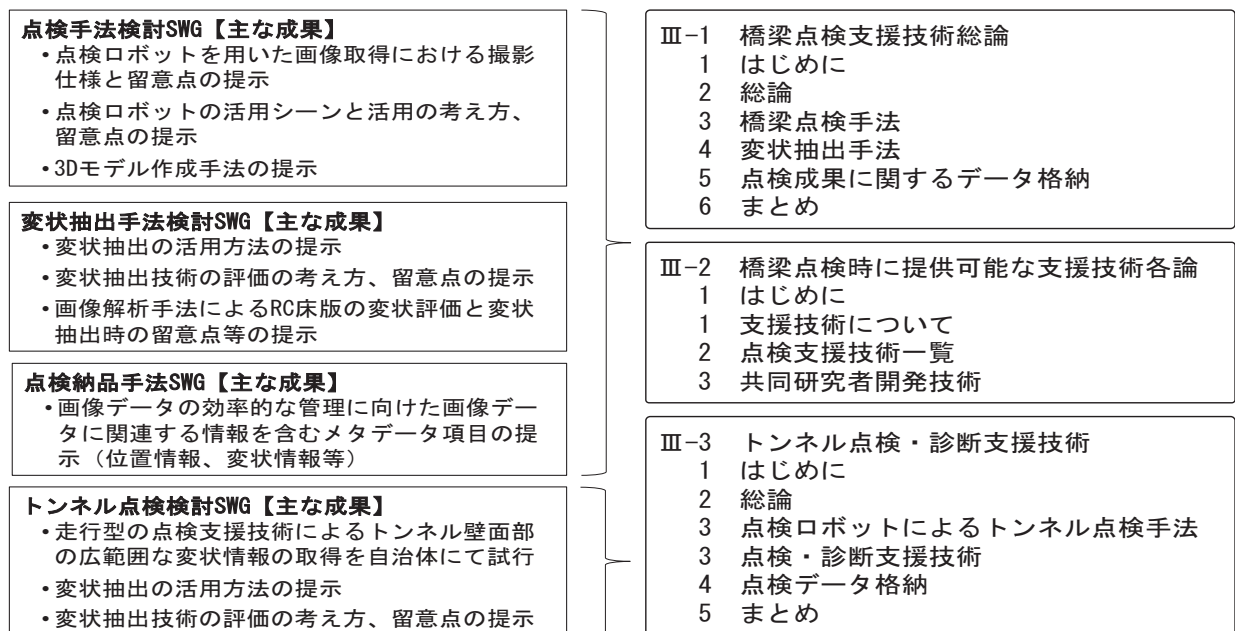


図 1-4 共同研究報告書の構成

参考文献

- 1) 澤田守, 江口康平, 石田雅博: 道路橋の予防保全に向けた総合診断と診断AIシステムの研究開発, 土木技術資料, 第63巻, 第10号, pp.8-11, 2021
- 2) 藤木裕二, 岩谷祐太・田中良樹, 石田雅博: RC床版の土砂化の予防保全に向けた技術開発, 土木技術資料, 第63巻, 第10号, pp.20-23, 2021
- 3) 茂木正晴, 二宮建, 森川博邦: 効率的な道路橋点検手法と点検AIシステムの研究開発, 土木技術資料, 第63巻, 第10号, pp.28-33, 2021

2 総論

2.1 本研究の要旨

道路トンネルは、全国で約 1.1 万箇所設置されており、人力による近接目視や打音検査等により定期的な点検を実施している。2012 年に発生した笹子トンネル事故以降、事故防止の観点から適切な維持管理が求められている。安全で迅速・効率的に変状等の取得を図るための点検支援技術が求められる。

本研究では、安全かつ効率的な点検を支援するための点検ロボットや、取得された変状等の大量な画像等の情報を効率的に整理することが可能な点検 AI の活用に向けた取り組みを進めている。

本報告は、インフラ点検支援技術として開発された点検ロボットの活用と作業支援として利用する点検 AI の活用シーンを提案、企業等によって開発された点検 AI を現場で活用するため、統一された評価方法により客観的で公平な評価とするための手法と評価例について述べる。なお、本研究は、“AI を活用した道路メンテナンスの効率化に関する共同研究（2018 年度～2021 年度）”における点検 AI(画像解析)開発グループ内のトンネル点検支援技術検討 SWG の研究成果である。

2.2 トンネル点検・診断の実態と課題

道路トンネルや鉄道トンネルの維持管理の目的は、利用者被害を未然に防止し、安全な通行を確保することにある。一般にトンネルの維持管理は、点検、調査、対策の流れで実施されており、点検や診断で健全性を評価した上で効果的な対策を行うことで目的を達成する。多数のトンネルを効率よく効果的に対策を行うため、点検サイクルや調査、対策の要否、緊急度をトンネルの健全性や路線ネットワークの重要度、予算等から維持管理計画（長寿命化計画）を策定し戦略的に維持管理を進めることが重要となっている。

国土交通省 HP 道路統計年報 2021¹⁾トンネルの現状より、図 2-1 に示すように道路トンネルは、全国で 10,922 箇所設置され、地方公共団体（指定区間外を含む）は 7,817 箇所(72%)、国土交通省では 1,650 箇所(15%)、高速自動車国道 1,455 箇所(13%)を管理している。

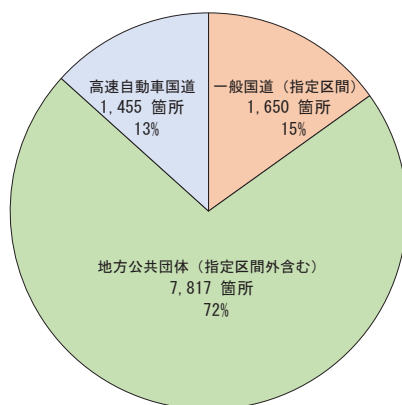


図 2-1 日本におけるトンネル本数 (国土交通省 HP 道路統計年報 2021¹⁾)

道路トンネルは、国民の生活を支える社会インフラとして重要なものであり、事故等の発生に伴う社会的な影響は多大なものとなる。特に設置されている道路トンネルの多くは、高度経済成長期に施工されたもので老朽化が懸念されている。

平成 26 年 6 月トンネル維持管理のあり方が見直され、道路トンネルにおいては、5 年に 1 回の間隔で点検を行うことが義務化された。トンネル点検は、近接目視で行うことが基本であるが、従来の点検技術においては、①スケッチによる変状の記録、②打音により点検者の主観による判定、③暗所で狭隘の作業であるなどの理由のため、安全性や客観性に乏しく、見落としの発生や変状の進行を適性に評価できないなどの課題が指摘されている。

定期点検は、図 2-2 に示すように人力による点検により、近接目視を基本とした状態把握を行い、診断等に必要な情報の整理や点検結果を平面図に記録している。

しかし、人力を中心とした作業であることから広範囲を漏れなく点検するため、多くの時間を要している。そのため、点検維持管理コストの増大、突破的に発生する地震等による災害への対応、トンネルに関する専門的な知識を持った熟練技術者の減少といった課題を抱えている。

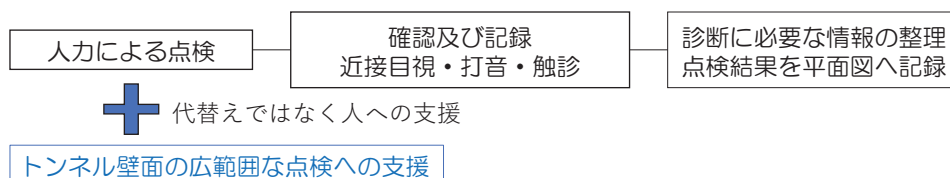


図 2-2 トンネル点検の流れと支援技術の活用

また、道路トンネル内部の多くは、覆工と呼ばれるコンクリート壁（図 2-3）に覆われており、点検時においてひび割れを中心とした状態の把握を人力による近接目視によって確認及び記録している。

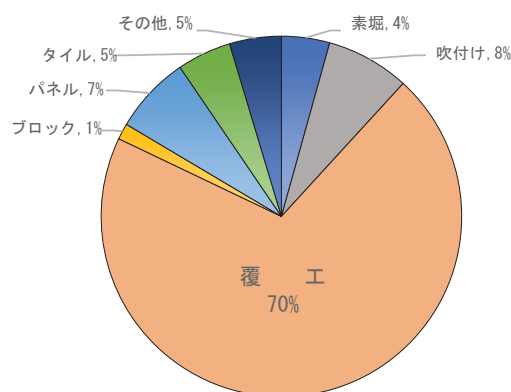


図 2-3 トンネルの構成材料（国土交通省 HP 道路統計年報 2021）¹⁾

2.3 研究の目的と範囲

本研究は、トンネル点検の実態で述べた課題への対応として、効率的・効果的なトンネル維持管理を目的とした技術開発に取り組むこととした。

研究開発のアプローチとして、ロボット・AI技術に着目し、メンテナンスサイクルにおける点検・診断・措置の信頼性向上を目指した支援技術に関する研究開発を進めた。

なお、トンネル点検における支援技術に関する研究範囲は、図 2-3 に示すコンクリート覆工部（壁面）における変状把握とし、主として外力及び材質劣化により初期段階より発生するひび割れを対象とした。

本研究対象となる点検ロボット及び点検 AI は、これまで人力によって行われてきたコンクリート壁面部の広範囲な変状情報を効率的に取得するための支援技術と診断に必要な変状情報等について整理する支援技術を対象とした。（図 2-4 に示すオレンジ色が点検ロボット、緑色が点検 AI の研究範囲となる。）

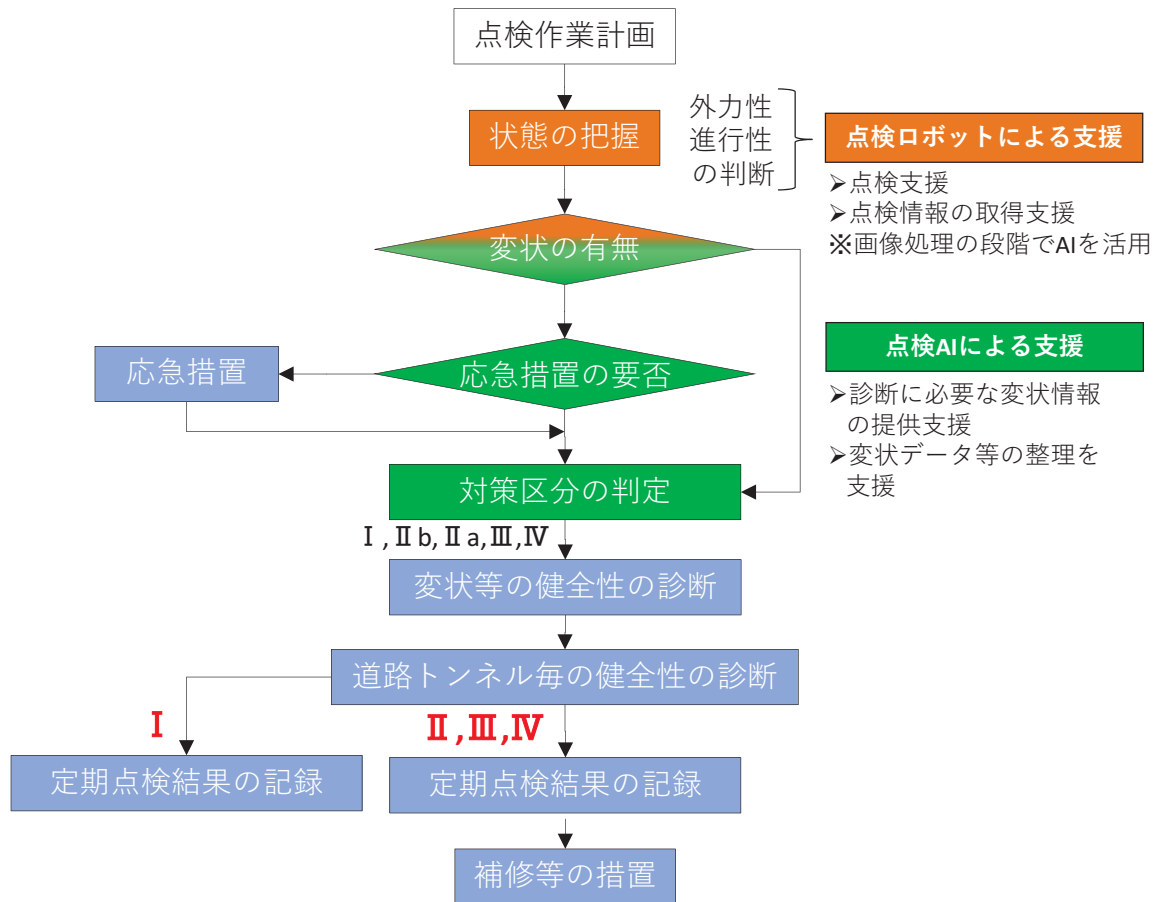


図 2-4 トンネル点検の流れ

2.4 トンネル点検・診断の今後の望ましい方向性

2.4.1 従来点検に対する位置づけ

従来点検に対する位置づけとしては、道路トンネル定期点検要領に準拠し支援することを基本方針としている。道路トンネル定期点検要領（H31.3 版）に定められている新技術導入のためのポイントは、①近接目視で行うことを基本とする、②初回点検は、全面目視、全面打音、③2回目以降の打音箇所を明確化、④近接目視とは、肉眼、接近、⑤所要の品質として、近接目視と同等の診断ができる点検を行う者が判断した場合は、その他の方法も近接目視を基本とする範囲と考えてよい、⑥必要に応じ、非破壊検査を適用する、などが挙げられる。道路トンネル定期点検要領（H31.3 版）において、近接目視の支援として新技術を活用して良いことが明記された。

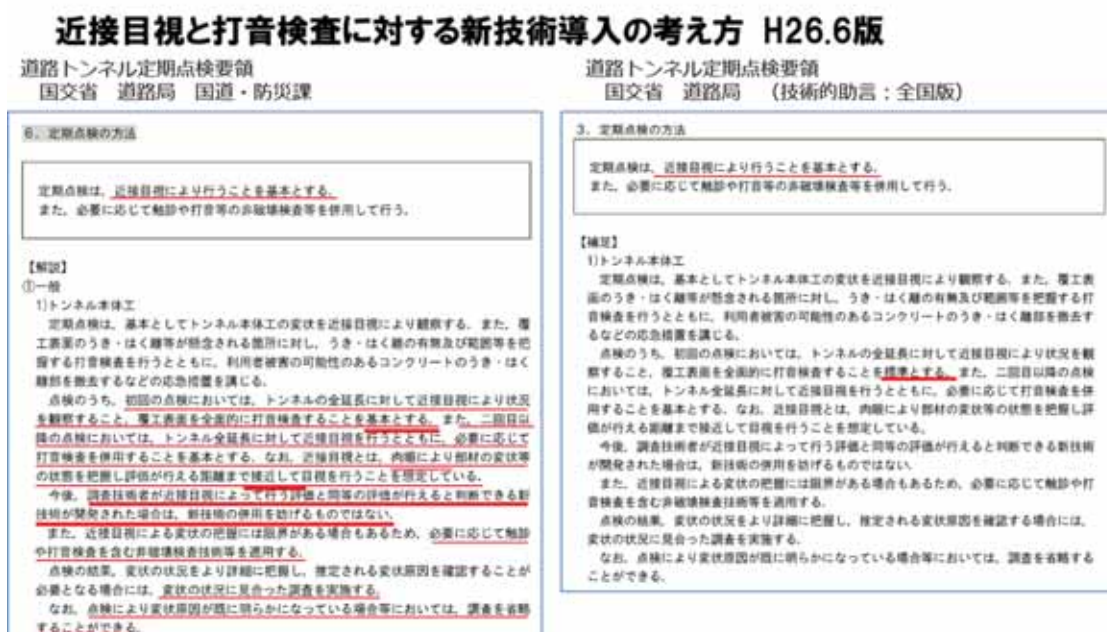


図 2-5 道路トンネル定期点検要領 H26.6 版²⁾

近接目視と打音検査に対する新技術導入の考え方 H31.3改訂版

道路トンネル定期点検要領

国土省 道路局 国道・技術課

道路トンネル定期点検要領

国土省 道路局 (技術的助言：全国版)

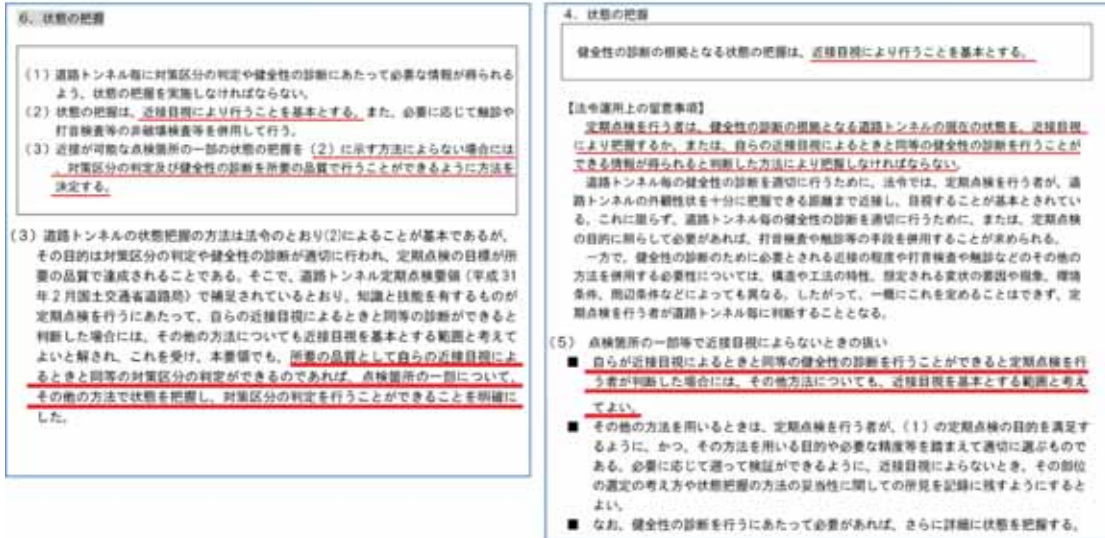


図 2-6 道路トンネル定期点検要領 H31.3 版³⁾

近接目視と打音検査に対する新技術導入の考え方

H26点検要領のポイント

- ・近接目視で行うことを基本とする
- ・初回点検は、全面目視、全面打音
- ・2回目以降は、全面目視、必要に応じ打音
- ・近接目視とは、肉眼、接近
- ・近接目視と同等の評価が行える新技術の併用を妨げない
- ・必要に応じ、非破壊検査を適用

H31点検要領のポイント

- ・近接目視で行うことを基本とする
- ・初回点検は、全面目視、全面打音
- ・2回目以降の打音箇所を明確化
- ・近接目視とは、肉眼、接近を想定
- ・**所要の品質として、近接目視と同等の診断ができると点検を行う者が判断した場合は、その他の方法も近接目視を基本とする範囲と考慮してよい**
- ・必要に応じ、非破壊検査を併用する

新技術利用の
ガイドライン
新技術の性能カタログ

図 2-7 道路トンネル定期点検要領 (H31.3 版) 改訂のポイント

2.4.2 目指すべき方向性

目指すべき方向性としては、①人力による近接目視、打音検査を完全に省略することは得策ではない、②ロボットによる点検は、人力による点検の支援、③ロボットの得意とする領域で支援する、(客観的で正確な記録、高精度な位置情報、進行性評価)、④人力による点検の限界をカバーし、ヒューマンエラー防止(記録漏れ、見落とし)、打音深度補完、⑤非破壊検査、調査の支援とする。

点検要領に示された点検フローの各フェーズに対し、走行計測システムにより支援できる内容を図 2-8 に示す。本システムによる高度化技術により従来点検を支援し、診断は確実に人が実施するという位置づけである。客観的な位置情報を保持した記録に関してはロボット

の得意とするところであり、変状進行性の把握、スケッチの省力化には特に有効であり、積極的な活用を想定している。

走行型計測の効果的な運用方法としては、図 2-8 の点検の流れのとおり、近接目視の前に走行計測を実施し、健全部スクリーニングにより、近接目視と打音検査を実施する範囲を低減する方法が現実的である。また事前に画像から展開図を作成しておくことにより、近接目視点検時には、展開図の修正を行うことに集中すれば現場の点検時間、コストを低減させることが可能となる。

国土交通省道路局にて、橋梁、トンネルの定期点検へ新技術を積極的に活用することを目的として「点検支援技術性能カタログ(案)」が平成 31 年に策定され⁴⁾、毎年掲載技術が拡充されている。点検支援技術の活用においては、図 2-9 に示す新技術利用のガイドライン(案)⁵⁾が示されており、活用の促進が図られている。このような背景を受けて、令和 4 年 3 月国土交通省にて、定期点検の高度化、効率化を図るとともに、新技術の開発を促進する目的で、直轄国道の橋梁とトンネルの定期点検業務において、点検支援技術の活用を原則化することが決定され⁶⁾、一層の活用促進が推進されている。

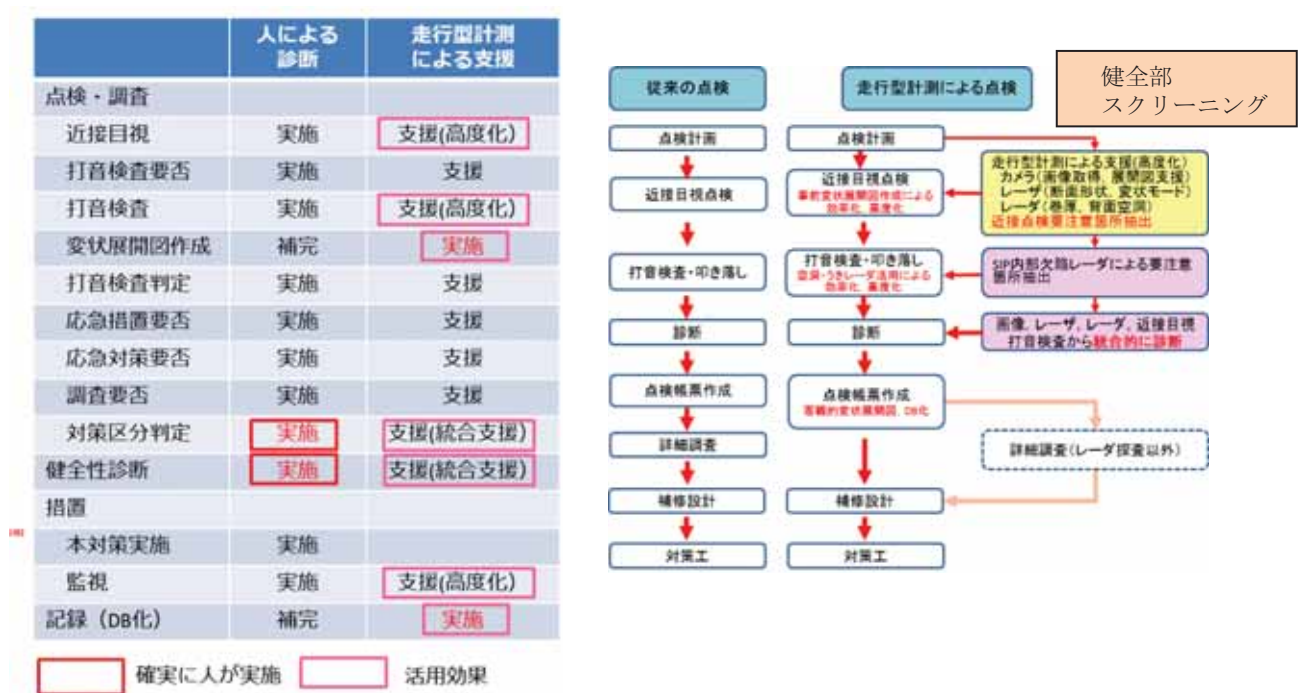


図 2-8 基本的フローに対する走行型計測による支援内容

ガイドラインは、定期点検業務の中で受発注者が使用する技術を確認するプロセス等を例示。
 性能カタログは、国が定めた技術の性能値を開発者に求め、カタログ形式でとりまとめたもので、
 受発注者が新技術活用を検討する場合に参考とすることができる。

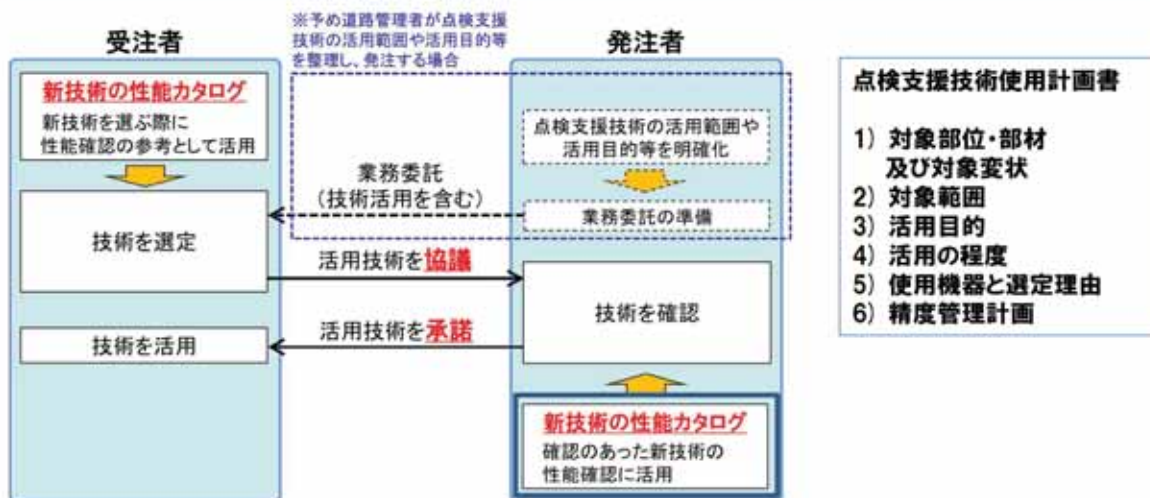


図 2-9 新技術利用のガイドライン⁵⁾

参考文献

- 1) 国土交通省 HP 道路統計年報 2021, <https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokeinen/2021/nenpo04.html>
- 2) 道路トンネル定期点検要領, 国土交通省, 平成 26 年 6 月
- 3) 道路トンネル定期点検要領, 国土交通省, 平成 31 年 3 月
- 4) 点検支援技術性能カタログ, 国土交通省, 平成 31 年 (最新版は令和 4 年 9 月)
- 5) 新技術利用のガイドライン (案), 国土交通省, 平成 31 年 2 月,
- 6) トンネル, 橋梁の定期点検における点検支援技術活用の原則化について, 国土交通省事務連絡, 令和 4 年 3 月 29 日

3 点検ロボットによるトンネル点検手法

3.1 点検ロボットの必要性

3.1.1 現況の課題に対する解決策

トンネル点検においては、トンネル構造物特性から、①スケッチによる変状の記録、②打音により点検者の主観による判定、③暗所で狭隘の作業であるなどの理由のため、安全性や客観性に乏しく、見落としの発生や変状の進行を適性に評価できないなどの課題が指摘されている。

これらの課題解決のため、平成31年2月に新技術利用のガイドライン(案)が制定され¹⁾、性能カタログを活用して点検支援新技術の適用が進められている。令和2年度の「橋梁、トンネルの点検支援技術の公募」の別添資料；点検支援技術の開発の方向性によれば²⁾、新技術活用の方向性は、①部位・部材の状態把握は、目的に応じて最適な技術を組合せて効率的に実施、②健全性の診断は、AI等の技術も活用しつつ（知識と技能を有する者）が実施、③3巡目点検に向けて、想定される利用に応じレベルを設定するとされている。

レベル1では画像や非破壊技術による作業の効率化、状態把握の質の向上、レベル2では計測・モニタリング技術による任意のタイミングで状態把握、レベル3では健全性診断のための情報を定量的に把握、レベル4では診断の定量化を目指している。

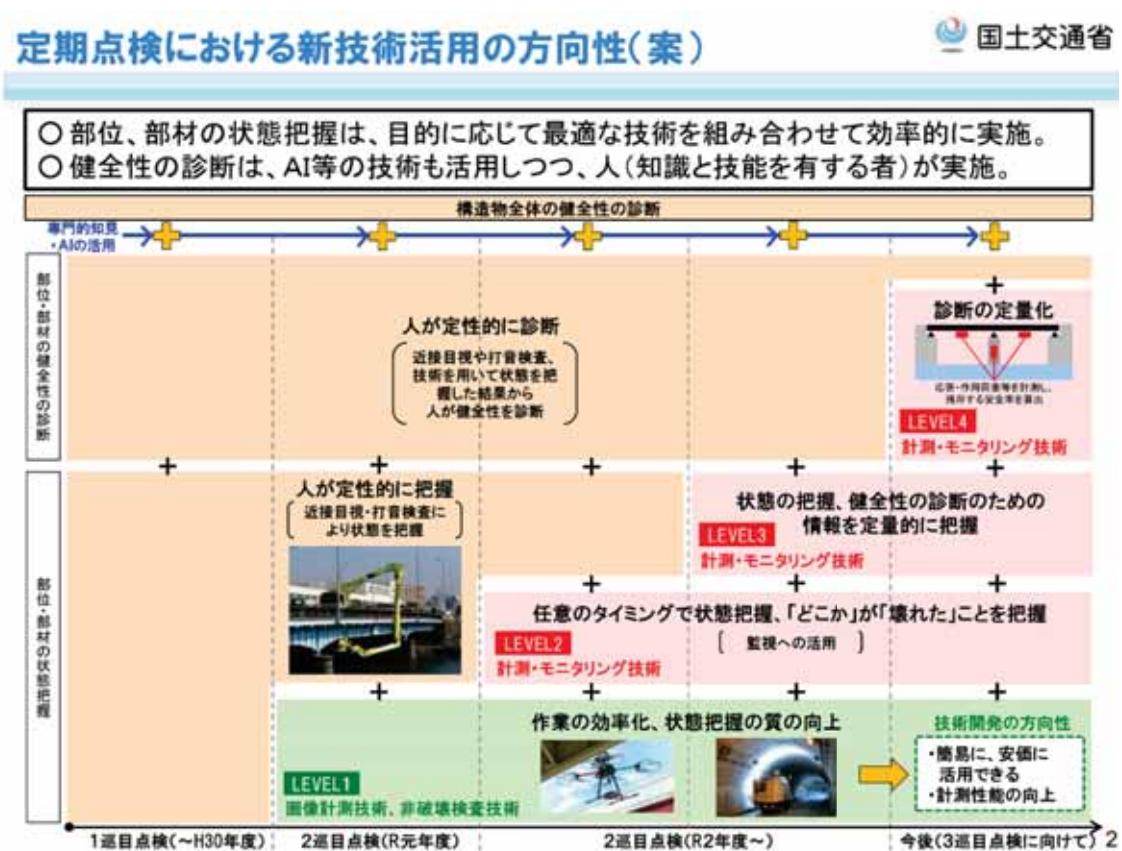


図 3-1 性能カタログ 新技術活用の方向性²⁾

同別添資料「点検支援技術の公募に係るリクワイヤメント」によれば³⁾、外力性、うき・はく離、空洞・内部欠陥などの覆工の状態把握や、附属物等の取り付け状態の把握、および点検の現場作業の効率化、内業の省人化、省力化について、リクワイヤメントが示された。覆工の状態把握では、想定する技術（例）が示され、ひび割れやうきの位置、覆工厚、空洞規模、覆工の形状・変形などの計測項目が例示された。

3.1.2 求められる用途・技術

図 3-1 の新技術活用の方向性によれば、部位、部材の状態把握技術が求められており、点検時の作業の効率化、状態把握の質の向上が求められている。技術開発の方向性として、簡易、安価、計測性能の向上が目指すべき方向性である。

これら性能カタログの整備のなかで整理されてきた方向性であるが、トンネル点検に係わる技術者らは、これまでも同様の方向性を認識し、走行型計測車両を 20 年ほど前から開発してきた経緯がある。

トンネルは線状構造物であること、断面変化が殆どないことから、走行型計測に向いており、交通規制をしないで、画像やレーザを活用した計測技術が開発されてきた。性能カタログや NETIS においても、同様の計測車両が数多く登録されている。

このような観点から、図 3-1 に基づき今後求められる用途、新技術を以下に整理した^{4)加筆}。

(1) レベル 1 において求められる用途・技術

1) 点検の効率化

- ① 近接目視点検における作業効率化（目視点検人員削減、点検日数縮小）
- ② 事前に画像から AI による変状抽出を行い、展開図を作成しておき、スクリーニングしておくことで、近接目視時の点検作業（接近目視確認、打音検査）の効率化を図る
- ③ 点検表や調書作成作業の効率化を図る

2) 診断の効率化

- ① 変状展開図と同スケールで作成する覆工壁面展開画像による目視点検に先立つ画像診断（AI による変状抽出、変状展開図作成）による効率化
- ② 変状展開図の高品質化（変状位置精度の正確性）
- ③ 判定の目安に対する判断情報付加による適正な健全度診断

3) AI 技術

- ① 変状抽出・点検支援 AI（漏水や遊離石灰で不可視ひび割れを検出する技術）
- ② 対策工区分判定に必要な、外力性か材質劣化かを判定する技術
- ③ 外力性・進行性診断 AI

(2) レベル 2 以降において求められる用途・技術

1) 点検・診断の効率化、省力化、定量化

- ① 近接目視、打音検査を除外できる健全部のスクリーニング技術

- ② 近接目視を基本とする点検を代替する技術
- ③ チョーキングを省略し、効率化、省力化する技術
- ④ うき、はく離を定量的に評価できる技術
- ⑤ 打音検査を代替する技術
- ⑥ 重要な変状、明確な進行性、補修跡の進行把握
- ⑦ 画像、変形、非破壊など、物理モデルを含め総合的に変状原因、健全性診断を行う技術
- ⑧ ひび割れや漏水等の覆工の表面の情報だけではなく、変形・移動・沈下、巻厚や背面空洞、覆工コンクリート内部欠陥などの情報を考慮し、総合的に健全性診断を支援する技術
- ⑨ 要注意箇所の変化を検知するシステム
- ⑩ 措置の提案や実施時期を支援する技術

2) 自動化技術

- ① 進行性自動把握、前回との比較・差分を自動で把握する技術
- ② 自動診断システム（状態把握、進行性、措置必要性、履歴管理の一連を自動で処理、診断する技術）
- ③ センサによる自動監視技術

3) 遠隔化技術

- ① AR,VR,MR を活用し、遠隔診断ができる技術
- ② 点検を遠隔支援する技術

3.2 点検ロボットに求められる機能・性能

点検ロボットに求められる機能・性能を以下に纏めた⁴⁾加筆。

3.2.1 画像技術

(1) 変状抽出性能

- ① 計測値として、ひび割れ（幅 0.3mm，長さ，範囲，形状）を把握できる
- ② ただし矢板工法において，幅 1mm のひび割れが確実に検出できれば，ひび割れの対策区分を行うことは可能であり，重要なのはひび割れの微細な幅ではなく，ひび割れの状況である
- ③ 漏水，遊離石灰，はく落，目地，変色を把握できる
- ④ 附属物や補修工において，範囲や形状を把握できる
- ⑤ ひび割れの閉合や交差，密集なども把握でき，うきにつながる変状を予測できる
- ⑥ 従来のスケッチと比較し，正確に変状位置を把握できる

(2) 画像による変状抽出の課題

- ① うきの打音異常は，検出困難である
- ② ひび割れは，外力か，材質劣化によるものか，判断することは困難である
ただしひび割れ状況より，目地部の半月状のひび割れ，ブロック化したひび割れ，亀甲状のひび割れ等は材質劣化と，推定は可能である
- ③ 覆工の段差箇所を検出することは困難である
- ④ 漏水の量は検出できない
- ⑤ 巻厚不足，背面空洞を検知することは不可能である
- ⑥ 異なる計測手法による画像の処理（画質，アスペクト比など）

3.2.2 計測・モニタリング技術

トンネルの計測・モニタリング技術としては，レーザによる点群計測があげられる。

(1) 変状計測性能

- ① 計測値として，トンネル断面形状が把握できる
- ② 断面形状の変化，変状の進行性が計測できる
- ③ 外力性変状原因の有無が把握できる
- ④ 天端沈下，側壁押し出し，路面隆起などの変状モードが把握できる

(2) レーザによる変状計測の課題

- ① うき，はく落などの変状検出は容易ではない
- ② 2 時期差分解析において，比較中心軸，縦断方向の位置同期が重要
- ③ （回転補正，縦断位置補正などが必要）
- ④ 衛星受信状況による計測結果への影響考慮
- ⑤ 異なる計測手法による差分解析技術の検討が必要

3.3 点検ロボットの活用シーン

これまでにトンネル点検，診断に対する点検ロボットの必要性，求められる用途・技術などを整理した．本節においては，特に本研究の主題である点検・診断支援 AI における点検ロボットの活用シーンについて取り纏めた．

点検 AI による支援を考えるうえで，どのような場面で活用することが適切かを把握する必要がある．そのため，点検時において点検技術者への支援を考えた場合，人の行動プロセスを把握する必要がある．

人の行動プロセスは，「ものを認識する，記憶する，判断する，意思決定する，動作する」という脳内での情報処理に基づき決定されることが一般的である．点検技術者は，図 3-2 に示すように点検時に近接目視や打音検査により変状等を発見・取得している．その後，判定・診断に必要な様々な情報(設計情報・設置環境等)と知見・経験から損傷原因を特定(認識)し，維持管理に必要な具体的な方策(判断)に基づき適切な維持管理(実行)を行っているものと考えられる．

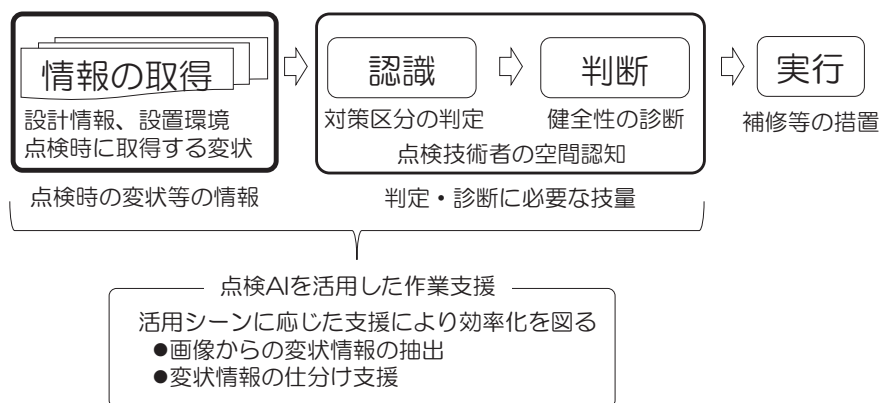


図 3-2 人の行動プロセスと AI の位置付け

点検 AI は，これまで点検技術者が行ってきた変状等の情報整理を支援することで点検技術者の作業軽減・合理化が可能となるものと考えられる．

点検 AI の活用にあたっては，これまでの作業に対する負担軽減を考慮し，取得された変状情報の整理場面として，以下の 4 つの活用シーンを提案した．

① 活用シーン 1

点検時に取得された情報から変状の有無のみを点検 AI によって推論し，推論された結果に基づき点検技術者が対策区分の詳細を画像情報等により判定し，変状等によるトンネルの健全性の診断を行う．

② 活用シーン 2

点検時に取得された情報から変状の有無及び変状の種類を点検 AI によって弁別し，弁別された結果に基づき技術者が対策区分を判定し，変状等によるトンネルの健全性の診断を行う

③ 活用シーン 3

活用シーン 1,2 では、変状の有無を支援することによる作業負担軽減を目的としたものである。活用シーン 3 では、道路トンネル定期点検要領⁵⁾に基づき点検時に取得した変状情報について設定された閾値に基づき点検 AI による対策区分のスクリーニングを支援するものである。点検 AI によって、ひび割れの幅と長さを推論することで、作業が軽減され、推論結果から詳細な対策区分について技術者が健全性の診断を行うことが可能となる。

④ 活用シーン 4

点検時に取得した変状情報を道路トンネル定期点検要領⁵⁾に記載されている対策区分の目安に基づき点検・診断 AI による弁別を行い、弁別された結果を技術者が確認し、健全性の診断を整理する。

なお、民間企業等における点検 AI の開発状況は、活用シーン 1~3 となっており、スクリーニングを中心とした技術者の作業負担の軽減を目的としたものとなっている。本研究における点検 AI は、活用シーン 3 を想定したものとなっており、異なるひび割れ幅の推論が可能なものである。

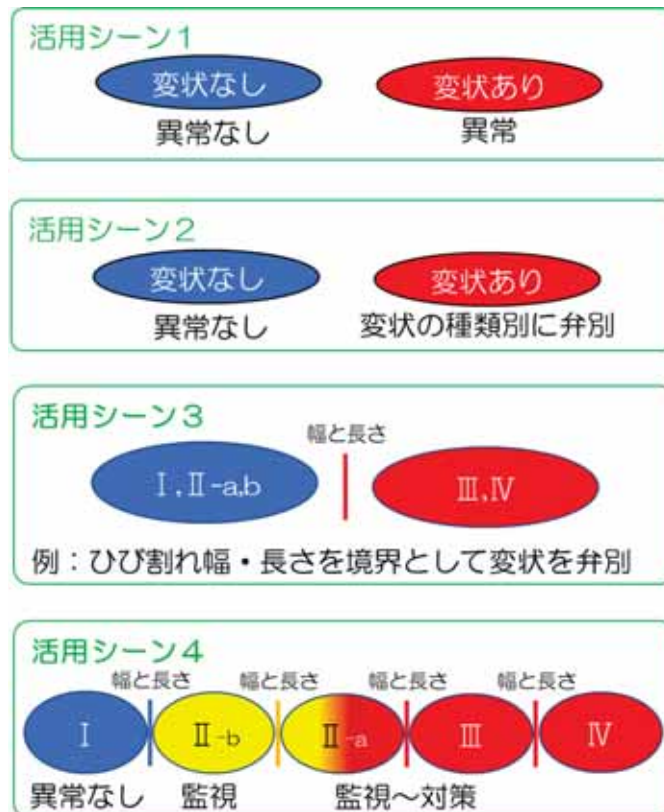


図 3-3 トンネル点検・診断 AI による支援の活用シーン

3.4 走行型トンネル点検システム 手法 1

3.4.1 概要

(1) 開発の目的

走行型高速 3D トンネル点検システム：MIMM-R の開発目的を以下に述べる。

道路トンネルや鉄道トンネルの維持管理の目的は、利用者被害を未然に防止し、安全な通行を確保することにある。一般にトンネルの維持管理は、点検、調査、対策の流れで実施されており、点検や診断で健全性を評価した上で効果的な対策を行うことで目的を達成する。多数のトンネルを効率よく効果的に対策を行うため、点検サイクルや調査、対策の要否、緊急度をトンネルの健全性や路線ネットワークの重要度、予算等から維持管理計画（長寿命化計画）を策定し戦略的に維持管理を進めることが重要となっている。

平成 26 年 6 月トンネル維持管理のあり方が見直され、道路トンネルにおいては、5 年に 1 回の間隔で点検を行うことが義務化された。トンネル点検は、近接目視で行うことが基本であるが、従来の点検技術においては、①スケッチによる変状の記録、②打音により点検者の主観による判定、③暗所で狭隘の作業であるなどの理由のため、安全性や客観性に乏しく、見落としの発生や変状の進行を適性に評価できないなどの課題が指摘されている。

上述した課題に対する解決策として、MMS (Mobile Mapping System) と MIS (Mobile Imaging System) を搭載した走行型トンネル点検車「MIMM (ミーム)」を 2010 年に開発した。この車両は、覆工壁面の連続画像計測やレーザ計測ができ、交通規制を必要とせず、高速走行しながら精度の良い、客観的な変状把握が可能である。ただし、覆工巻厚や背面空洞の点検ができないという課題が残っていたため、2014 年 2 月にレーダ探査装置を搭載した車両を開発した。この車両を、「MIMM-R (ミーム-アール)」と名付け、車両天井部に設置した非接触型レーダアンテナにより、覆工巻厚および背面空洞を高速走行しながら点検できる機能を追加した⁶⁾。レーダ探査により巻厚不足や背面空洞の有無を把握することが可能となり、健全度診断をする上で情報量が向上した。

しかし、覆工表面にひび割れ、漏水、段差などを伴わない「うき、ジャンカ、材質不良などの内部欠陥」については、上記車両が高速走行・非接触型であるがゆえに発見できないという課題が残っていた。そこで、SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) において、打音検査の代替技術、補完技術という位置付けで、覆工コンクリートの内部欠陥検出に焦点を当て、高速走行型非接触レーダにより検出する点検技術を平成 28 年度に開発完了し⁷⁾、その後実用レベルで運用している。また、内部欠陥を含む多くの変状情報をレーザ計測の 3 次元位置情報と同期し、高精度な変状図を 3 次元可視化技術によってデータベース化するとともに、健全性を総合的に評価できる統合型診断システムの開発を行い⁷⁾、現在は本システムによる点検支援の確立および実用化の深度化を進めている。

本システム概要を図 3-4、および走行イメージを図 3-5 に示す。取得できる内容、機能は以下のとおりである。

- ①高精度な地形測量：3次元点群データから、道路データを縮尺 1/500 精度で作成することができる。

- ②トンネルレーザ計測及び変形モード解析：100 万点/秒の高精度レーザスキャナにより，高密度な点群データを取得し，トンネル覆工の形状，覆工の変形（変形モード，目地・ひび割れの段差）を客観的に把握可能である。
- ③トンネル画像計測及び損傷度評価：速度 50～70km/h で走行しながら取得した壁面画像より，0.3mm 程度以上のひび割れを把握できる．客観的，正確な展開図が作成でき，変状進行性の把握や変状原因推定が可能である。
- ④地中レーダによる探査：走行型非接触レーダにより，壁面までの離隔 3m 程度，速度 50km/h 程度以上で走行しながら，巻厚，背面空洞，内部欠陥を探査できる⁷⁾。

これらから得られた個々の結果を総合的に判断することで，トンネルに発生している変状原因を推定でき，要注意箇所を抽出し，効率的な近接目視点検，打音検査，および詳細点検・補修計画の立案が可能となる。



図 3-4 走行型計測システム (MIMM-R)



図 3-5 MIMM-R 計測状況

(2) 技術的特徴および機能

本システムは以下の技術的特徴および機能は以下のとおりである。

図 3-6 走行型計測システム (MIMM-R) の技術的特徴

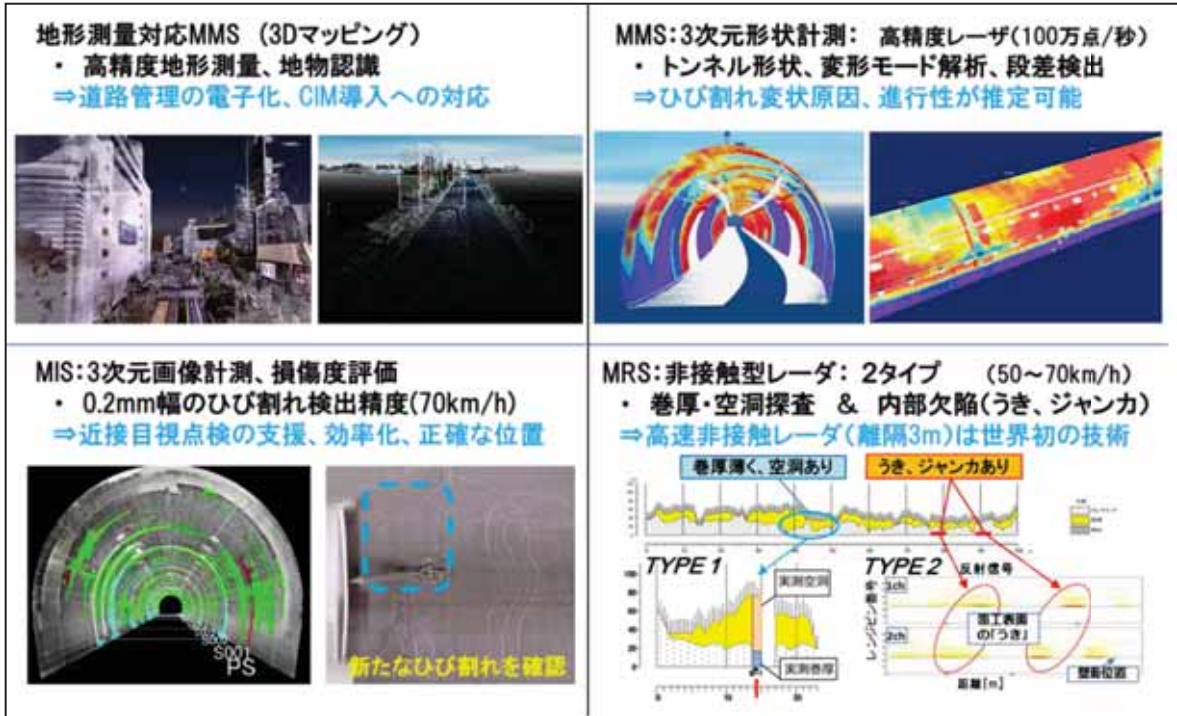


表 3-1 走行型計測システム (MIMM-R) の機能

機能	具体的な内容	目的	備考
①トンネル 画像撮影	・画像により変状を 確認・抽出	・正確な変状展開図の作成	
②レーザ計測	・高精度レーザによる 三次元の点群データ の取得	・変形モード解析を行い、コンター図を 作成。 ・変状展開図と合わせて分析を行うこと により変状原因を追究する。	
③非接触レーダ 探査 1	・巻厚・空洞用非接触 レーダ探査	・覆工厚および覆工背面空洞の調査。 ※コンクリート厚 45cm 程度まで確認可 能。	
④非接触レーダ 探査 2	・「うき」など内部欠陥用 非接触レーダ探査	・うき、ジャンカなどの探査。	

(3) 画像解析

①画像色調補正

取得した展開画像について、色調の補正を行う。

②画像貼り合わせ

取得した展開画像を、変状展開図に合せて画像の貼り合わせを行う。

③ひび割れ変状抽出・展開図作成

展開画像よりひび割れ等の抽出を行い、変状展開図の作成を行う。



図 3-7 トンネル画像撮影・変状展開図作成例

(4) 変形モード解析

①三次元座標変換処理

レーザ計測により取得した三次元座標の変換処理を行う。

②変状コンター図作成

三次元の点群データを用いて、変状コンター図の作成を行う。

③変形モード解析

「変形モード」と「覆工面の変状状況」を比較して、変状原因を推定する（偏圧などの外力性の有無）ことを目的として、取得した点群データをもとに、作成したトンネルの平均断面より、変形モード解析を行い評価する。

図 3-8 に、覆工面の変状と変形モードの結果より、外力性の有無を判断した例を示す。

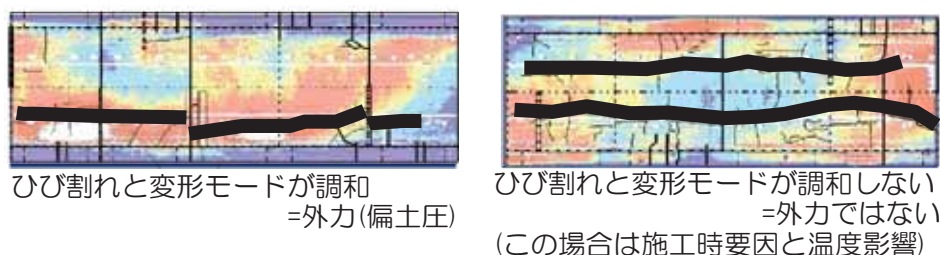


図 3-8 走行型計測による変状原因の推定例

図 3-8 の左図は、肩部が内空側に押されている傾向（コンター図で赤色）であり、同じ位置に縦断方向のひび割れがあると、「変形モード」と「変状状況」が一致していることから、「外力性の変状」の可能性が疑われる評価になる。右図は、ひび割れと変形モードが調和しておらず、外力性の変状ではない可能性が高い。図 3-9 に、変形モードとひび割れの関係イメージを示す。

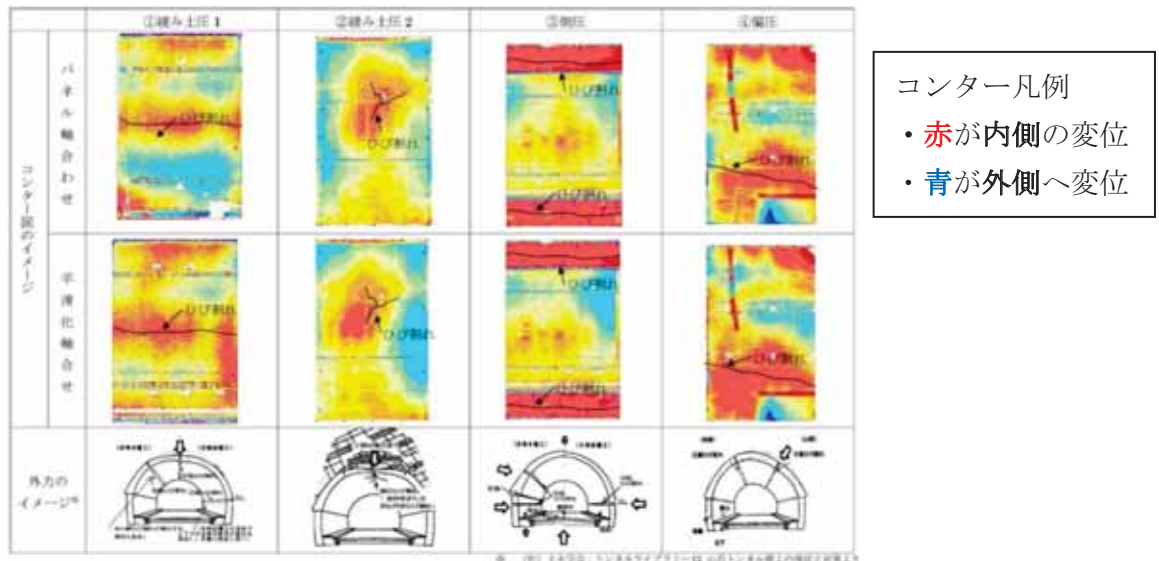


図 3-9 変形モードとひび割れの関係イメージ

(5) レーダ計測

1) 巻厚・空洞探査レーダ

① 走行計測

走行しながら、覆工巻厚および背面空洞の探査を行う。

- ・取得情報
 - レーダ伝播時間
- ・活用技術
 - 覆工コンクリート厚
 - 背面空洞の厚さ
 - 支保工・鉄筋の位置



巻厚・空洞探査レーダ
(既存レーダ移設:開発済み)
【 1GHz 】

図 3-10 MIMM-R 空洞レーダシステム

② 計測結果の解析

図 3-11 のように取得したレーダ伝搬時間を解析し、図 3-12 の巻厚・空洞解析図を作成する。

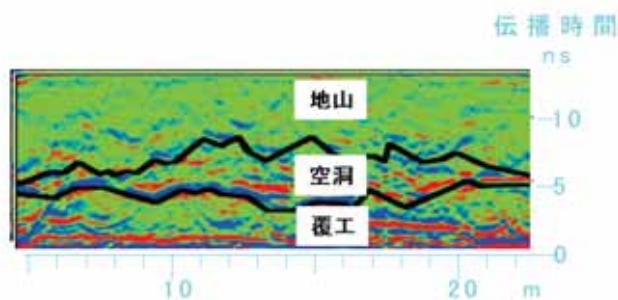


図 3-11 解析結果(1)

図 3-12 の縦軸は覆工表面からの深度、横軸はトンネル進行方向距離を示す。図中○表示しているように、巻厚が薄く、背面空洞が大きな箇所が問題となる。このような問題となる箇所を非接触、高速にスクリーニングすることが本レーダの目的である。

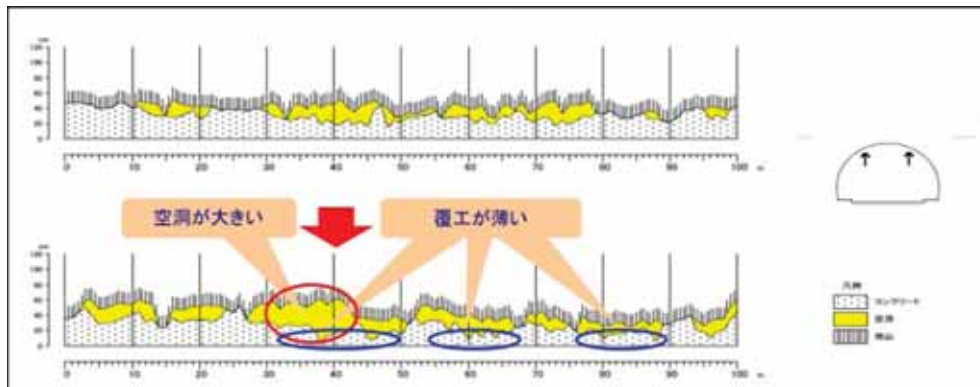


図 3-12 解析結果(2)

2) 内部欠陥探査レーダ

① 走行計測

走行しながら、うき、ジャンカなどの内部欠陥の探査を行う。



図 3-13 レーダアンテナ

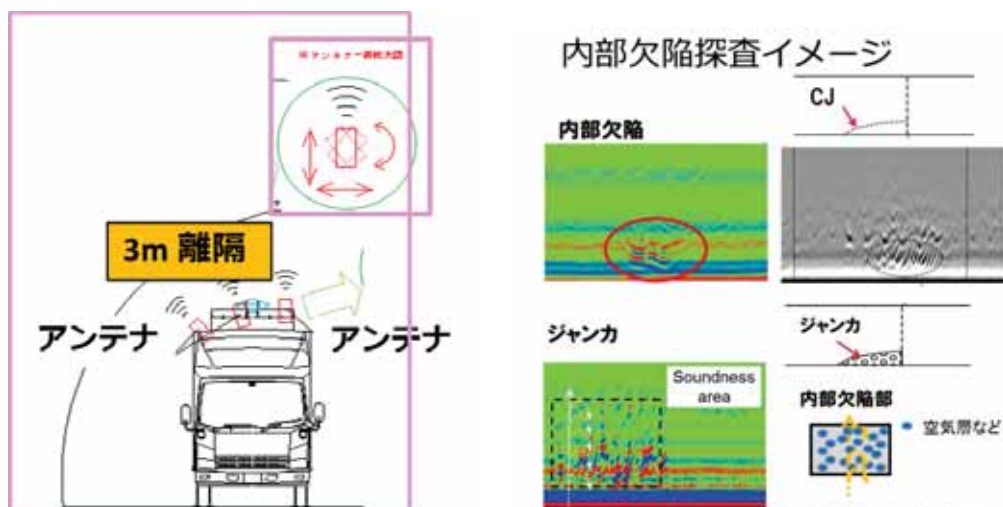


図 3-14 MIMM-R 内部欠陥探査レーダシステム

②計測結果の解析

取得した記録を解析し、内部欠陥位置図を作成し、巻厚・空洞・欠陥を重ねて診断する。

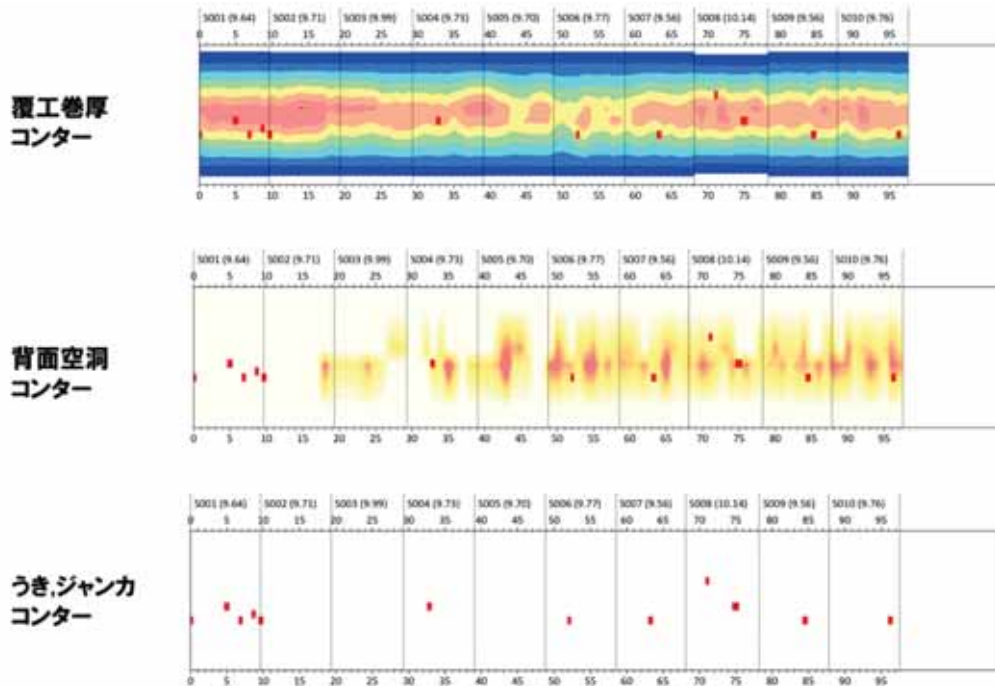


図 3-15 MIMM-R レーダシステム解析結果

覆工巻厚コンター 赤：巻厚が薄い箇所

背面空洞コンター 赤：背面空洞を検出した箇所を空洞深さ

うき, ジャンカ 赤四角：内部結果レーダで検出したうきなど

(6) 変状展開図作成

走行型計測結果を踏まえて、画像ベースの変状展開図を作成する。

(7) 総合判定

走行型計測結果による変状展開図、レーザ計測による変状原因推定、レーダによる空洞、内部欠陥などの結果を総合し、検討方針に示した検討内容を実施する。

3.4.2 機能

(1) 走行型画像計測

1) 計測原理

連続画像撮影システムは覆工面を照射する照明装置部と覆工面において 1.5 mm/px 以上の高精細画像が取得できるカメラ部，取得した画像を連続記録するレコーダ部により構成される．カメラは 18 台搭載し，標準的（ $\phi 5.0\text{m}$ 程度）な円形トンネルの覆工表面のうち片側半断面を 1.5 mm/px 以上の解像度で撮影可能である．

主な仕様はレンズ部，光学 16 倍 Auto Focus Zoom レンズ（焦点距離=8mm(wide)～128mm(tele), F 値=1.6～），センサー部は Sony 製 CMOS IMX265LQR より構成され 1 台あたりの有効画素数は 200 万画素．シャッタースピードは 1/1～1/10000 秒間を 22 ステップで設定が可能．専用のソフトウェアによりレンズズーム率，絞り値，シャッタースピードを設定しそれぞれの被写体（主にトンネル）に応じた撮影を可能とする．

雲台は雲台制御装置・雲台制御 PC で一括制御され自動で任意の角度に設定が可能．

専用のソフトウェアによりそれぞれの被写体（主にトンネル）に応じて 0.1 度単位で位置決めを行う．

トンネル内部でカメラの適正露出を確保するには光源が必要なため，LED 投光器を 48 台搭載している．撮影時に覆工表面を直接光，散乱光，間接光で照射が可能．10W ハイパワーチップを搭載した超小型・軽量 LED 投光器，7LED タイプである．

撮影データは画像記録装置(レコーダ)に DVCAM (25Mbps) 方式で記録される．連続 3 時間記録可能でタイムコードにて同期している．操作は専用コマンドで一括制御が可能であり，ソフトウェアにより録画，再生，頭出し等を行うことが出来る．

取得した動画データ(AVI)は静止画(BMP/JPG)に変換後，画像処理ソフトで合成を行い，展開図として出力する．その展開図を基にひび割れや変状の確認・抽出を行う．



図 3-16 画像撮影装置

2) システム仕様一覧

連続画像撮影システムの仕様一覧を下表に示す。

表 3-2 システム仕様

	項目	仕様	条件, 備考
1	ひび割れ認識精度 ^{*1}	0.2mm	ただし 1.5 mm/px 以上の解像度で撮影した場合
2	LED 照明	48 台	防水等級 IP68 相当
3	カメラ	18 台 : 200 万画素	
4	標準計測速度	~ 50km/h	高精度 3 次元レーザ計測システムと同時計測の場合は舗装道路条件下であること
	最高計測速度	70km/h 程度	
	最高移動速度	70km/h 程度	
	段差乗り越え能力	最大 10cm	
5	連続記録時間	3 時間	
6	いすゞエルフ 3 トン	4WD エアサス仕様	
<p>*1 : 精度計測条件 : 覆工表面が清浄状態(煤等で覆われていない)である事. 漏水, 結露, 靄, 霧が発生していない事. カメラに直接写らない構造物の裏等は対象外とする.</p>			

3) 調査全体の流れ（作業フロー）

走行型計測の作業フローを図 3-17 に示す。

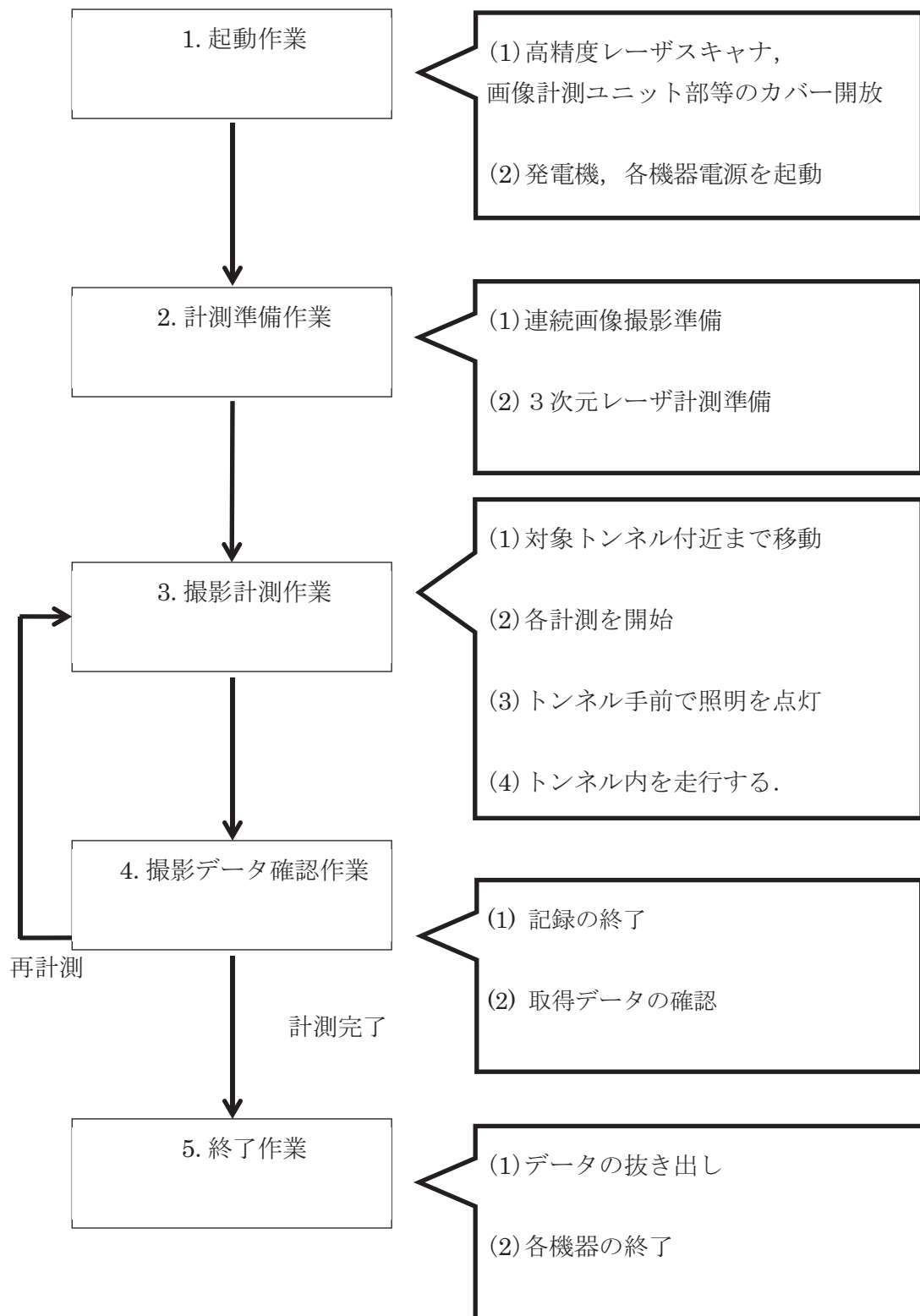


図 3-17 作業フロー

4) 計測性能

画像撮影装置の計測性能は下表のとおりである。

表 3-3 計測性能（性能カタログより抜粋）⁸⁾

項目		性能		性能(精度・信頼性)を確保するための条件
計測装置	撮影速度	検証の有無の記載 ※	有	<p>【条件は下記の各性能も共通】</p> <p>【天候】 降雨時はレンズに付いた水滴により鮮明な画像が撮影できないため不可。</p> <p>【路面状態】 舗装状態が望ましい。整地されていれば未舗装でも対応可能（車両揺れが激しい(大きい)場合、覆工壁面に対する被写体距離と角度が大きく変化するため画質が劣る可能性があるため）。</p> <p>【GNSS測位】 GNSS測位可能な坑外から計測を開始できれば、坑内でのGNSS測位不可状態での計測が可能。</p> <p>【日照条件】 1000 lx 以上の照度から 70 lx 以下の環境照度に連続的に計測する場合は白飛びに注意（絞り等の設定変更により解消可能）。</p>
	計測精度	検証の有無の記載 ※	有	<p>【性能値】 ・最小ひび割れ幅の検出分解能は0.3mm程度 ・ひび割れ幅の検出は0.5mm刻み程度で運用</p> <p>【標準試験】 ・最小ひび割れ幅0.2mm （0.2mmのひび割れを画像で視認できる） ・計測精度0.43mm （0.2mmのひび割れのみを対象とした検出性能） ・吹付けコンクリート面での計測も可</p> <p>【性能値】 画像によるひび割れ検出の最小検出分解能は0.3mm程度で、閉合ひび割れ、クロスひび割れ、変状の進行性、新規ひび割れ、ひび割れ密度の変化などを画像から確認できる。 ひび割れ幅の検出は検出手法上0.1mm刻みの検出は可能であるが、実務上0.5mm刻み程度で運用している。</p> <p>【標準試験】 計測精度の0.43mmは、模擬供試体の0.2mmのひび割れに対し、ひび割れ幅を0.3mm刻み程度で検出したときの計測精度。【標準試験の計測精度は、TN010006-V0221確認シートを参照】</p>
	長さ計測精度 (長さの相対誤差)	検証の有無の記載 ※	有	<p>【性能値】 ・画像とレーザ点群を重畳させ変状長さ精度を向上（点群の坑口位置補正を実施）</p> <p>【標準試験】 ・標準試験の長さ計測精度は、TN010006-V0221 確認シートを参照</p>
	位置精度	検証の有無の記載 ※	有	<p>【性能値】 ・画像とレーザ点群を重畳させ変状位置精度を向上（点群の坑口位置補正を実施）</p> <p>【標準試験】 ・標準試験の位置精度は、TN010006-V0221 確認シートを参照</p>
	色識別性能	検証の有無の記載 ※	有	<p>【標準試験】 ・標準試験の色識別性能は、TN010006-V0221 確認シートを参照</p>

※ 「有」の場合は、性能確認シートを参照のこと

進行性の確認

変状（ひび割れ，漏水），補修跡等の位置情報の客観性に優れる
（MIMM：カラー，スケッチ：黒）

進行性の評価が容易

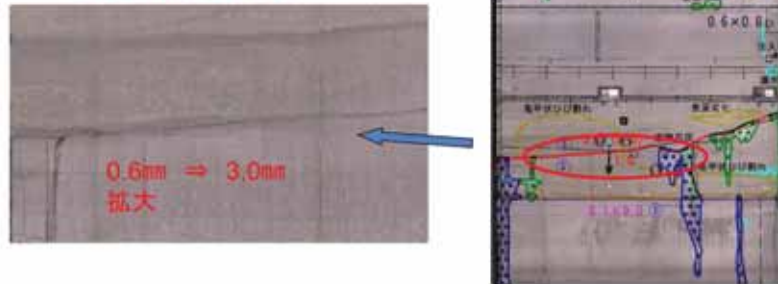


図 3-18 人カスケッチとの対比，進行性評価

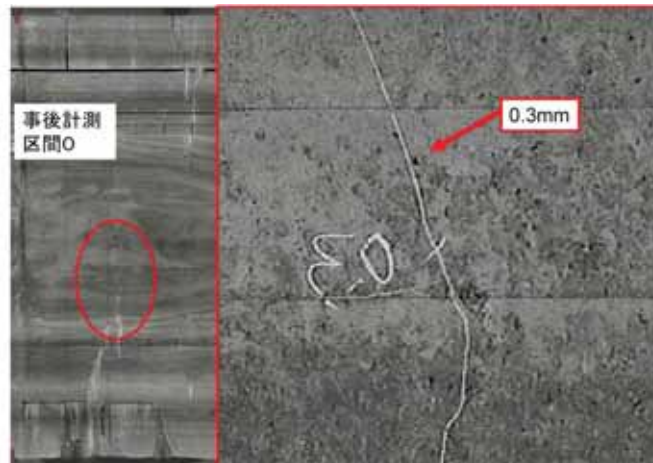


図 3-19 画像計測性能 0.3mm 程度以上のひび割れが計測可能

5) 画像処理，調書作成支援

A) 【統合型トンネル点検・診断支援システムの手順】

- ①近接目視点検前に交通規制なしで走行型計測車両 MIMM-R により，画像，レーザ，レーダの計測を実施
- ②iTAMS：データベースシステムにより，画像合成，画像による変状検出，展開図作成を実施
- ③展開図，画像をオンサイトシステム（iPad）に出力
- ④近接目視，打音検査時にオンサイトシステムを活用して効率化を図るとともに，点検結果をオンサイトシステムに反映
- ⑤オンサイトシステムから iTAMS：データベースシステムに点検結果を反映した展開図を作成し，点検・診断結果を PC 上で整理し，帳票に自動出力

⑥過去の点検記録，補修履歴などをデータベースシステムで一元管理

B) 【iTAMS：データベースシステムの機能】

- ①画像により変状検出・解析システム（画像合成，ひび割れ自動抽出等）
- ②Drawing システム（点検展開図等）
- ③データベースシステム（点検帳票自動作成，経年データの一元管理）
- ④Viewer システム（点検帳票，画像，3D）
- ⑤iPad 連携

C) 【画像による変状検出手順】（iTAMS：データベースシステムの機能の一部）

手法 1)

- ①撮影した画像を覆工 1 スパンごとに合成する．位置同期はレーザ点群座標による（自動・調整は一部手動）．
- ②ひび割れの自動抽出機能により，画像からひび割れ（幅，位置）を抽出する（自動・事前作業は手動）．
- ③最大ひび割れ幅によるひび割れ展開図に変換し，DXF 出力する（自動）．
- ④ひび割れ以外の変状については，画像から手動で抽出する（手動）．

手法 2)

- ①撮影した画像を覆工 1 スパンごとに合成する．位置同期はレーザ点群座標による（自動・調整は一部手動）．
- ②ひび割れ，漏水などの自動抽出機能により，画像からひび割れなどの変状を抽出する（ラスタデータ）（自動・ノイズ調整は手動）．
ひび割れ幅，長さを求め，対策工区分の判定を行う（自動・判定は一部手動）．
ひび割れ，漏水などをベクタデータとして展開図に変換し，DXF 出力する（自動）．

D) 変状検出の原理・アルゴリズム

①ひび割れ【画像による変状検出】

手法 1) 自社開発ひび割れ自動抽出ソフト HALCON

- ・ひび割れ自動抽出ソフト（HALCON）により，コンクリート面とひび割れのピクセルの輝度値から，ひび割れを自動抽出し，ひび割れ幅を検出する（ひび割れ以外は，手動検出）．

手法 2) AI による変状抽出ソフト セマンティックセグメンテーションによるディープラーニング

- ・ひび割れをピクセル単位でセマンティックセグメンテーションにより抽出する．
- ・使用する画像は，1.5mm/px 以上の画質（低圧縮 JPEG 画像）を用い，高精細化手法を併用．
- ・教師データは，100 スパン以上，1 タイル 256×256px (or 512×512px)，ひび割れを

ピクセル単位で作成.

近接目視点検前に計測した画像により画像と位置同期した展開図を作成する. 近接目視時に修正した点検結果としてのひび割れ判定を教師データ作成の基本とし, 画像上のひび割れを技術者が判断したうえで教師データを作成する.

- ・撮影条件・仕様等(手法1) 2) 共通)
 - 1) カメラ: ビデオカメラ
 - 2) 撮影設定: 絞り優先設定
 - 3) ラップ率: オーバーラップ 30%, サイドラップ 30%
 - 4) 分解能: 1.5mm/px 以上
 - 5) 画質フォーマット: JPEG, TIFF, PNG, BMP など
 - 6) 注意事項:
- ・画像から作成した変状展開図を近接目視時に確認し修正すること⇒教師データ作成は修正後の最終展開図を使用する. 展開図は画像と位置情報が一致している必要あり.

②ひびわれ幅および長さの計測方法

手法1)

- ・ひび割れ幅: HALCON によりピクセルの輝度値から, ひび割れ幅を検出する(1.5mm/px の解像度であるが, 輝度使用により 0.3mm 程度以上のひび割れ幅の検出が可能)
- ・ひび割れの検出レイヤ(0.3mm 未満, 0.3~0.5, 0.5~1.0, 1.0~2.0, 2.0~3.0, 3.0mm 以上を基本としたレイヤカスタマイズ可能)
ひび割れ長さ: ひび割れをポリラインに変換し, 長さを確認する. ひび割れ位置, 長さはレーザによる位置座標から算出している.

手法2)

- ・ひび割れ幅: セマンティックセグメンテーションにより, ピクセル毎のひび割れ存在可能性を算出する「ひび割れ検出アルゴリズム」により自動抽出する. 具体的には 2 倍の高精細化技術により, 1.5mm/px の解像度を 0.75mm/px に改善し, ピクセル以下のひび割れ幅については, 周辺のピクセルを使って補間し, 輝度による重み付けを行うことで, ひび割れの存在可能性の分布を求めることによって, 0.3mm 程度以上のひび割れ検出が可能.
- ・ひび割れ長さ: セマンティックセグメンテーションにより抽出したひび割れをベクタ化し, ポリラインでのひび割れ長さを検出する.

③ひび割れ以外の変状

手法1)

【漏水, 遊離石灰, はく落跡, 鉄筋露出, ジャンカ, コールドジョイント, 照明, ジェットファンなど】

- ・画像から手動にて抽出する. うきについては, 近接目視, 打音検査の結果を踏まえて修正する.

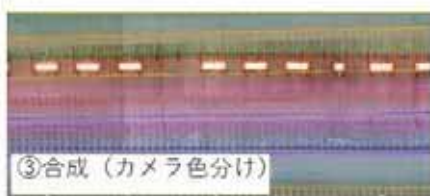
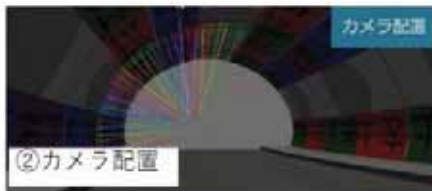
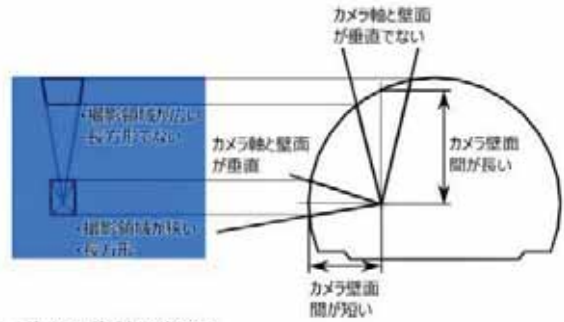
手法 2)

【漏水，遊離石灰，はく落跡】

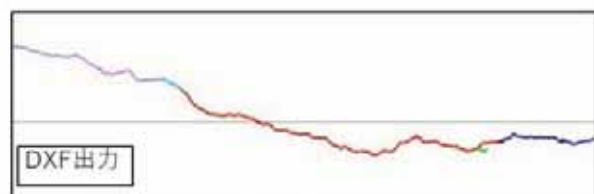
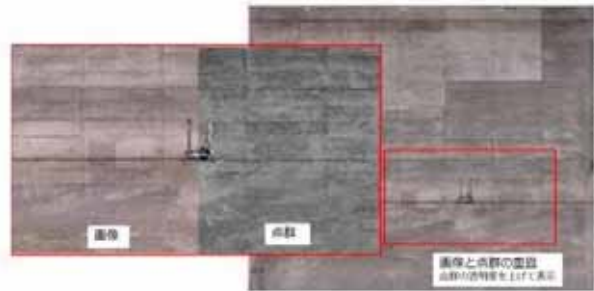
- ・ひび割れ同様，セマンティックセグメンテーションのアルゴリズムにより，ピクセル単位で，漏水，遊離石灰，はく落跡を抽出する．ピクセル集合体の面データ（ラスタデータ）として自動抽出する．
- ・教師データは，100 スパン以上，漏水など面データとしてピクセル単位で作成する．教師データは，画像のみの判断で作成せず，近接目視，打音検査の点検結果を反映させて作成する．



走行型計測車両MIMM-Rの走行イメージ（画像計測状況）



画像とレーザ点群の位置同期による
画像補正と合成



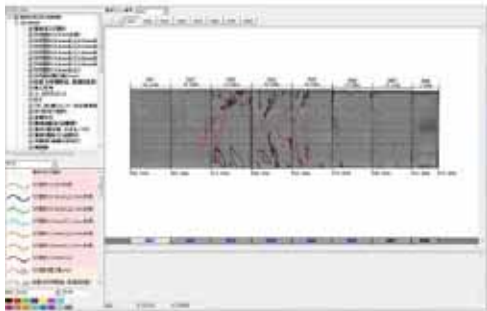
ひび割れ抽出の手順（手法 1）

図 3-20 変状検出手順

E) 調書作成手順

【iTAMS:データベースシステムによる調書作成手順】

- ①適応条件に記載の条件により画像データを取得する。
- ②画像データおよび同時に計測したレーザ点群データを支援ソフト iTAMS に取り込む。
- ③iTAMS のドロー編集画面にて、ひび割れ抽出、その他の変状抽出作業を行い、変状展開図を作成する。
- ④近接目視、打音検査を実施。事前に作成した変状展開図をタブレットに取り込み、現地にて修正作業を行う。
- ⑤iTAMS のドロー編集画面にて、変状箇所の抽出、対策工区分の判定などを行う。
- ⑥画像の他、レーザ、レーダの結果を一元化して 3D 可視化し、統合型評価診断システムにより診断する。
- ⑦抽出した変状箇所に応じた写真を帳票用に自動作成。
- ⑧点検帳票を所定のフォーマットに自動出力する。記録はデータベースで一元管理する。



iTAMS のドロー編集画面

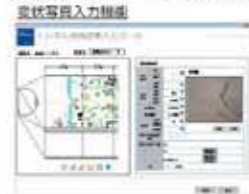


点検帳票例

点検帳票を所定フォーマットに自動出力



点検入力ツールの主な機能(上記以外)



ひび割れなどの変状、異常のスケッチを1つ1つ選択して、写真を特付け。写真はタブレット上からも撮影可能とする。
⇒現場で検査情報と写真が紐付けられるため、業務の効率化が図れる。



ひび割れなどの変状、異常のスケッチをトンネル全体もしくはスパン毎に集計することができる。
⇒換気写真の撮影・覆れ、損傷状況の記入漏れなどのチェックが図れ、点検データの精度向上が図れる。

オンサイトシステムの概要

図 3-21 iTAMS データベース, オンサイトシステムの概要

6) 適用条件

A) 適用条件

- ・ 車両通行が可能な道路トンネル
陸運局より規制緩和認可を受けており、道路使用許可申請なしに計測可能
- ・ 最高速度(計測時, 非計測時共) 70km/h 程度以下
最大耐風速: 30m/s (自車速度による風圧含)
- ・ 周囲温度: 0~+40°C (動作時), -20~+60°C (非動作時)
直射日光を避けての保管を推奨.
- ・ 天候: 1mm/h以下の降雨(ただし走行計測時以外は雨養生を行う事)
1mm/h以上の降雨が予想される場合, 計測中止等の対応が必要.
- ・ 振動衝撃
振動 2-8Hz : 10mmp-p, 8-50Hz : 12.75m/s²
衝撃 39.2m/s², 11ms (半正弦波)
- ・ 照明設備やジェットファン, 内装板の背面など計測車両から物理的に視野が確保できない
覆工表面の走行型画像計測はできない.

B) 留意点

(a) 機器精度に関する留意点

- ・ 範囲にわたる漏水, 結露または光沢のある(タイル等)内装板は照明の反射光がカメラレンズに入射し, 後の画像目視検査に悪影響を及ぼす場合がある. その場合は照明の配置, 照度等を考慮し反射光が直接入射しないように工夫する必要がある.
- ・ 雪や雨天またはトンネル内の漏水・湧水等, 水滴がカメラレンズに付着する可能性がある場合, モニタで常に監視し撮影画像の品質を確認し確保する必要がある. 水滴がカメラレンズに付着した場合は再撮影等の対策をする必要がある.

(b) 精度と信頼性に関する留意点

- ・ トンネル内において靄, 霧(モヤ, キリ)が発生する場合, 照射光が屈折するため, 画像の品質に悪影響を及ぼす場合がある. 季節や時間選定の検討が必要となる.
- ・ 構造上の要因(吹き付け, 段差, 付帯物の裏, 補強工, 導水工等)により画像による変状の判断が困難な場合がある. 免責事項等事前の打ち合わせが必要である.
- ・ 路面状態が著しく悪い場合(凹凸が激しい等)は後処理が困難な場合がある.
理想としては最終舗装がされた状態での走行が望ましい.

(2) 走行型レーザ計測

1) 計測原理

高精度 3 次元レーザ計測システムは、車両外部に搭載される「高精度レーザ」「GNSS ユニット」と車両内部に搭載される「記録ユニット」、車輪に搭載される「オドメータ」から構成される。高精度レーザスキャナは最大 100 万点/sec で高精度、高密度なデータを取得することが可能。またこのレーザ光は「IEC 規格 IEC60825-1 レーザ製品のクラス分け」より「Class 1」に相当する。

これら全てを制御 PC で操作し、走行中の GNSS 情報をはじめとする計測データの記録を行う。計測データは高精度 GNSS (FKP) 技術を用いた「MMS 後処理ソフトウェア」を使って高精度な位置情報、レーザ点群情報、映像情報など多種の空間情報を提供する。

GNSS/IMU/オドメトリによる測位システムを最大限生かし、精度を向上させるために、運用にあたり手順が定められている。図 3-23 に示すように、現場で行う作業（オンサイト）と事務所なり宿泊先でも可能な作業に分けられる。オンサイト作業は、車両を停めたまま行う作業と走行させて行う作業に分けられる。外観チェックは車体およびセンサ類に歪みや凹みがないか確認する。特にオドメトリ周辺に異物の挟み込みやネジの緩み、アームの曲がりがないかを確認する。カメラやレーザスキャナのカバーが開いていることを確認し、窓を清掃する。併せて HDD の残容量もチェックする。次に、MMS を上空が充分開けていて且つ、10 分程度停車できる場所に停止し GNSS 状態の確認を行う。方向角検定は 3 つの GNSS を用いて車体がどちらの方向を向いているかを計算する。充分に衛星を捕捉できる場所に移動し方向角検定を開始する。約 2 分程度かかる。初期化走行とは GNSS, IMU およびオドメトリを初期化・学習するためのプロセスである。6 分間の静止と左右 5 回以上のターンおよび 2km 以上の走行を行う。この後、現場計測を行い、終了走行として、初期化走行と同様な走行を行う。このあと、インターネットが使える環境において、記録データの後処理作業（オフサイト）を行う。



図 3-22 レーザ計測装置

レーザ計測で得られる点群データは単なる三次元の座標データでしかない。このため、トンネルの変形状態を判断するためには、基準となるトンネル出来形断面を設定し、その面に対して点群データがどのような位置にあるかをコンターで示し視覚化する必要がある。レーザ計測結果（点群データ）からコンターを作成するまでの大まかな流れを図 3-24 に示す。解析結果の事例を図 3-25 に示す。

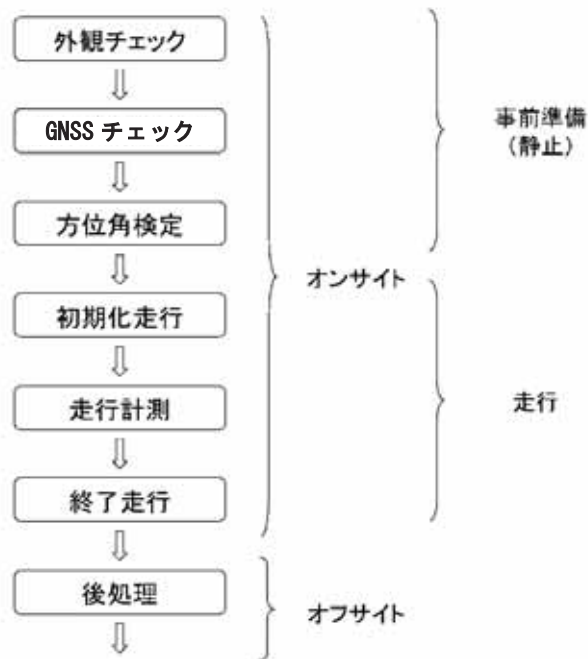


図 3-23 走行計測レーザの現場手順

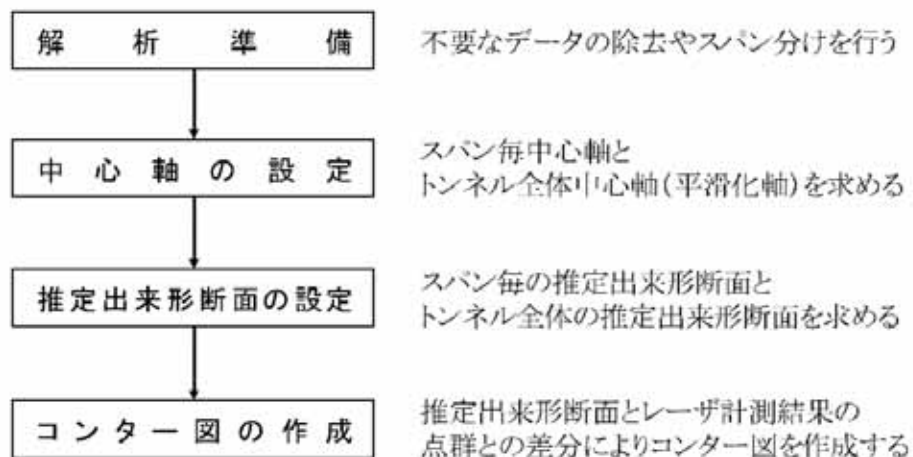
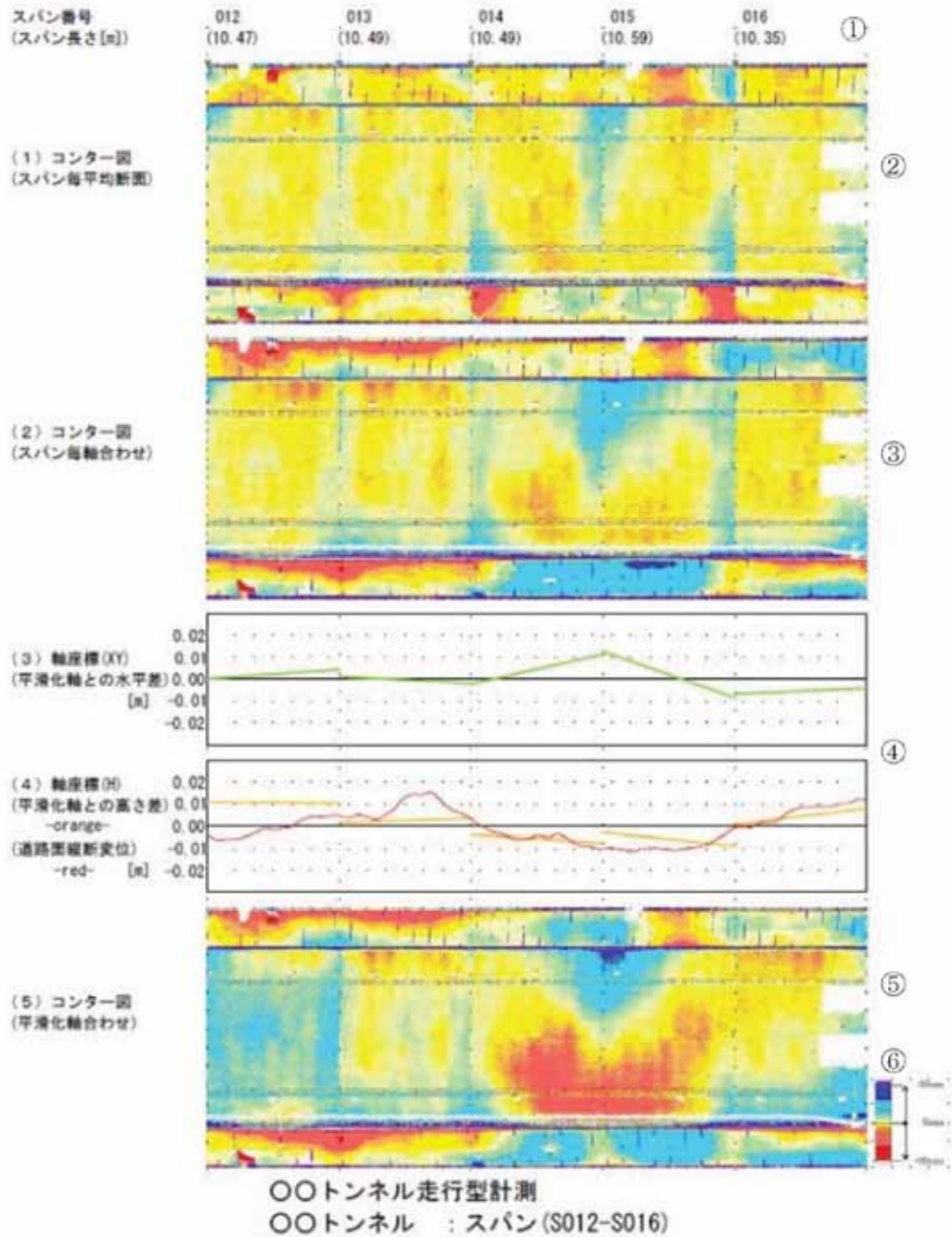


図 3-24 解析フロー



- 成果物の項目
- ① トンネルのスパン番号, ()の中はスパンの長さ(m)
 - ② スパン毎軸平均断面で解析したコンター図
 - ③ スパン毎軸合わせで解析したコンター図
 - ④ 緑……各スパン軸と平滑化軸との水平差
黄……各スパンの軸と閉殻化軸との高さ差
赤……道路面縦断変位
 - ⑤ 平滑化軸で解析したコンター図
 - ⑥ コンター凡例……赤が内側の変位, 青が外側への変位

図 3-25 解析結果の事例と解釈

2) システム仕様一覧

システムの仕様一覧を下表に示す.

表 3-4 システム仕様

	項目	仕様	条件, 備考
1	ひび割れ認識精度*1	0.2mm	ただし 1.5 mm/px 以上の解像度で撮影した場合
2	LED 照明	48 台	防水等級 IP68 相当
3	カメラ	18 台 : 200 万画素	
4	標準計測速度	~ 50km/h	高精度 3 次元レーザ計測システムと同時計測の場合は舗装道路条件下であること
	最高計測速度	70km/h 程度	
	最高移動速度	70km/h 程度	
	段差乗り越え能力	最大 10cm	
5	連続記録時間	3 時間	最徐行(5km/h 以下)条件
6	いすゞエルフ 3 トン	4WD エアサス仕様	

*1 : 精度計測条件 : 覆工表面が清浄状態 (煤等で覆われていない) である事. 漏水, 結露, 靄, 霧が発生していない事. カメラに直接写らない構造物の裏等は対象外とする.

3) レーザ計測処理フロー

フローを図 3-26 に示す.

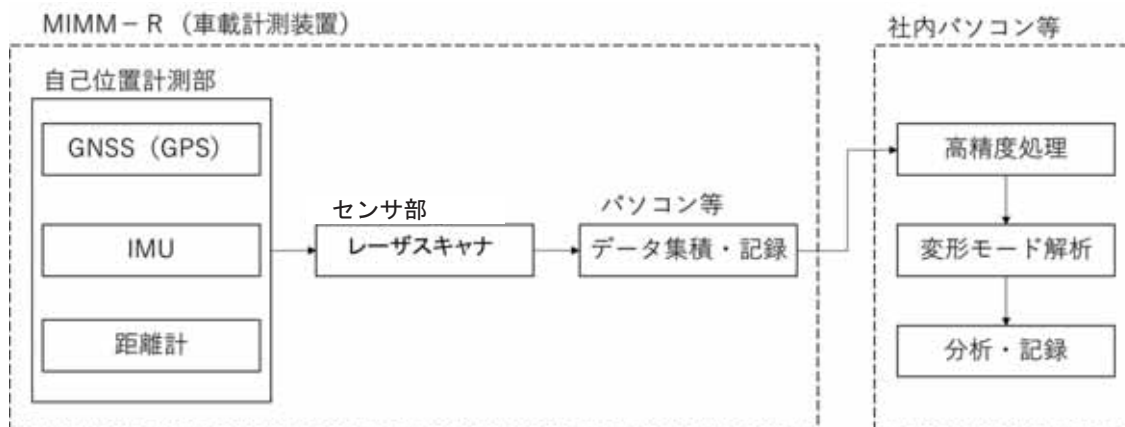


図 3-26 レーザ計測処理フロー

4) 計測性能

計測性能は表 3-5 に示すとおりである（性能カタログ⁸⁾ から抜粋）

表 3-5 レーザ計測性能

	検証の有無の記載 ※	有	
計測精度			<p>【性能値】社内検証実験の結果による 【標準試験】計測精度は確認シート参照</p> <p>・内空断面計測精度は平均化処理を行うことで±2mm ・相対差分計測は、外力等に伴う2時期計測差分および覆工表面の凹凸、段差などの相対差分で、確認シートより±1mm</p> <p>近接目視のみでは要因の特定（材質劣化によるものか、外力の影響なのか等）が困難な場合があることから、ひび割れの形態と覆工の変形モードの関係、および変形の進行性を把握することにより外力性が否かの覆工の状態把握を行う技術である。 計測精度が±2mmのとき、面的なコンター解析により外力性変状要因であるか否かを判定が可能であり、コンター差解析によって変状の進行性を把握することができる。</p>
計測速度 (移動しながら計測する場合)			<p>【性能値】 ・70km/h程度以下 【標準試験】 ・70km/h程度以下</p> <p>高速道路で規制なし走行計測ができること 渋滞や片側交通規制など速度一定とならない条件下でないこと</p>
位置精度 (移動しながら計測する場合)		無	<p>【性能値】 ・50mm程度以下(補正後) 【標準試験】 -</p> <p>・2時期の相対変位差分をとる場合のトンネル縦断方向の位置精度は、坑口、坑内補正を行うことで、50mm程度の位置精度。</p>

※ 「有」の場合は、性能確認シートを参照のこと

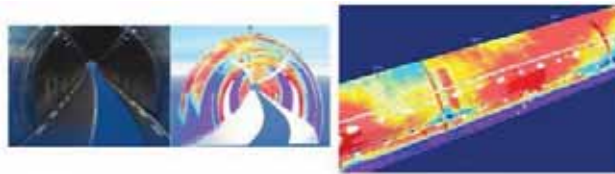
5) 解析プロセス

A) 変形モード解析（図 3-27 参照）

- ①高精度レーザスキャナによる計測（自動）
- ②点群データの後処理（自動）
- ③中心軸の設定（スパン毎中心軸とトンネル全体中心軸を求める）（自動）
- ④推定出来形断面の設定（スパン毎出来形断面とトンネル全体出来形断面を求める）（自動）
- ⑤コンター図の作成（推定出来形断面とレーザ点群との差分解析により 3 種類のコンター図を作成する）（自動）

【変形モード解析による変状原因の推定】

- ① 変形モード解析によるコンター図より、変状原因の分析を行う。
- ② 3 種類のコンターより、目的に応じた変状原因の分析を行う。



高精度レーザー 100万点/秒
周方向 5,000点/周 (4mm間隔)
走行方向 5cm間隔/40km/h

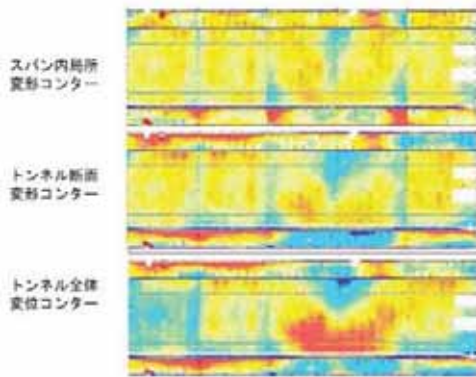
変形モード解析
コンター表示(赤:内面側、青:背面側)

レーザー点群による変形モード解析結果のコンター図



変形モード解析の手順 (トンネル形状の抽出処理)

スパン形状抽出の流れ



レーザー点群による変形モード解析結果のコンター図

解析手順に従い3種類のコンター図を作成する。

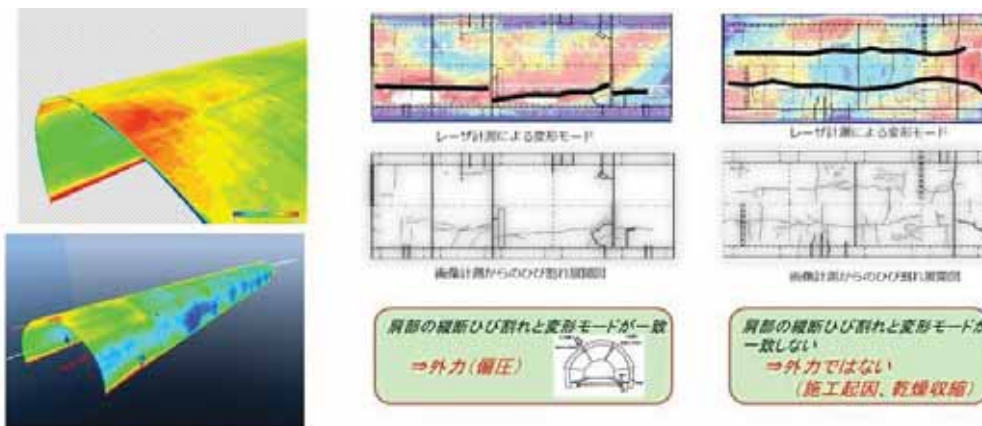
- ・スパン内局所変形コンター
推定出来形断面は各スパンの平均を使用し、軸は各スパンの中心軸を使用
⇒ スパン内の局所的な変形の傾向を評価するのに適する
- ・トンネル断面変形コンター
推定出来形断面はトンネル全体の平均を使用し、軸は各スパンの中心軸を使用
⇒ 各スパンの断面の変形の傾向を評価するのに適する
- ・トンネル全体変位コンター
推定出来形断面はトンネル全体の平均を使用し、軸は平滑化軸を使用
⇒ トンネル全体の変位の傾向を連続的に評価するのに適する

コンター図による評価

変形モード	推定手法	軸の長さ	トンネル全体の平均断面	スパンの中心軸断面	スパン内の局所断面
局所変形	スパン平均	各スパン	△	△	◎
断面変形	全体平均	各スパン	○	○	○
全体変位	全体平均	平滑化軸	◎	○	△

変形モード解析のプロセス

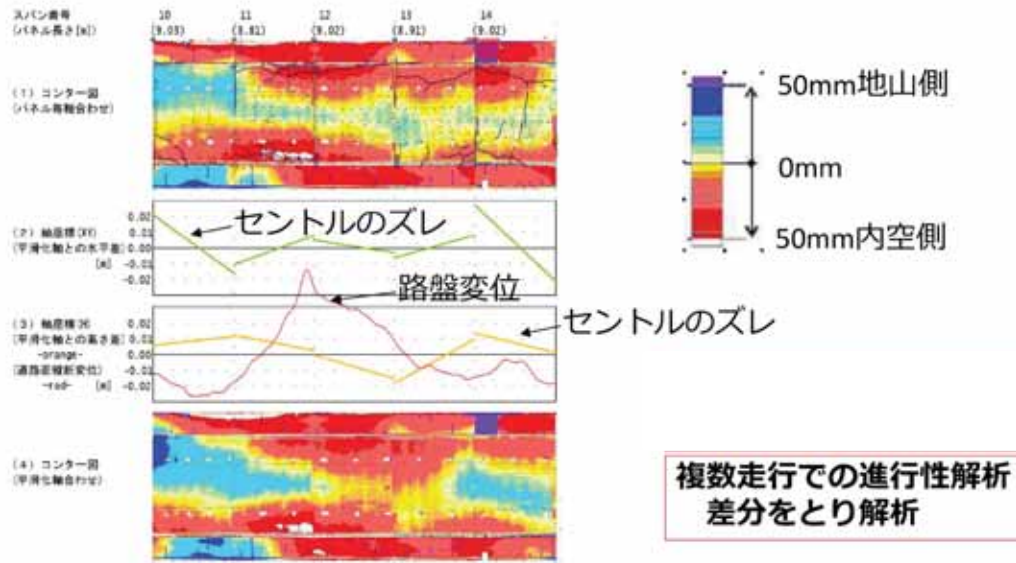
図 3-27 変形モード解析



レーザー点群による変形モード解析結果のコンター図

変状原因の分析の事例

図 3-28 変状原因の推定



※新都市社会技術融合創造研究会 道路トンネル健全性評価技術研究プロジェクトの手法に採用

図 3-29 変形モード解析の評価方法

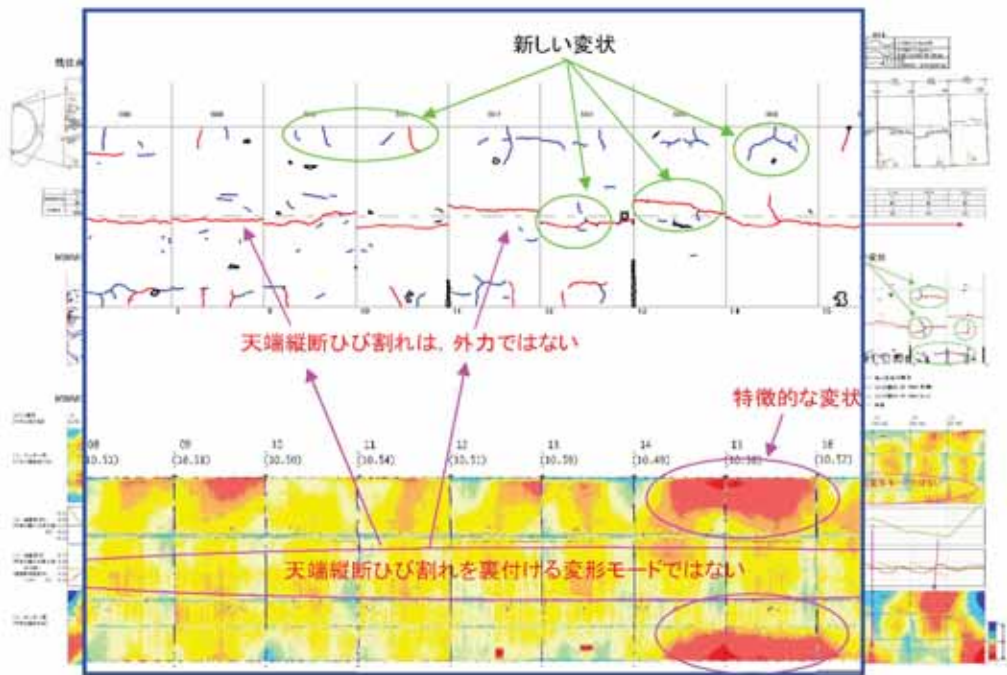


図 3-30 変状原因の推定（外力性ではない事例）

B) 変状進行性差分解析

2 時期の差分解析により、進行性評価を行う。

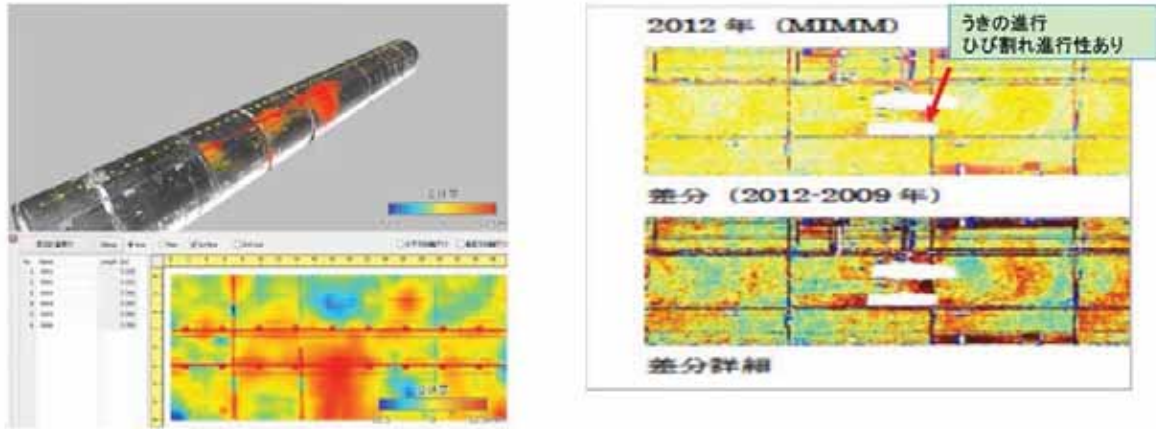
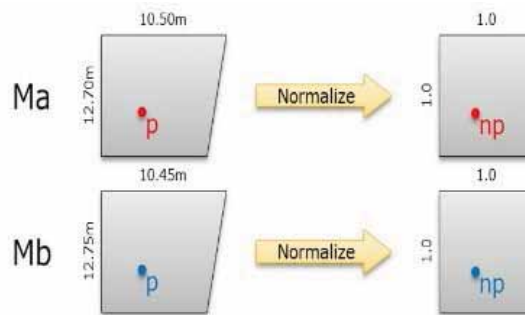


図 3-31 進行性差分解析

手順は下記のとおりである.

- ① 変形モード解析にて 2 時期のコンター図を作成 (自動)
- ② 2 時期の差分解析(自動)



2時期の位置合わせの方法

差分評価したい 2 個の展開メッシュは、それぞれ別のレーザ点群から生成されることと、経年変化で伸縮する可能性があるため寸法が完全一致することはないと考える。しかしながら現実的には同位置のスパンであるから大きく異なることはない。展開メッシュ同士の位置合わせを以下の仕様として、差分評価を行う。

図 3-32 差分解析における 2 時期の位置合わせ

C) 外力性診断 AI

トンネル点検時、発生した変状に対する変状区分判定は対策区分判定や健全性の診断時に不可欠である。外力性の判定は、従来は技術者の判断に任されており、確立した方法はない。変形モード解析結果と AI による変状検知結果から、以下の手順により、外力性の変状の発生を推定する外力性判定を行う。

- ① 高精度レーザスキャナによる計測 (自動)
- ② コンター図の作成 (推定出来形断面とレーザ点群との差分解析により 3 種類のコンター図を作成する) (自動)
- ③ 画像処理と点検結果の判定より、変状展開図を作成 (自動, 手動)
- ④ コンターとひび割れ展開図を使って、AI 処理により外力性診断実施 (自動)

専門技術者に依存していた外力性判定を、客観的な判断材料に基づき実施することが可能となり、外力性変状の問題箇所抽出や、従来は外力性と判定されているような事象に対しても、外力性変状では無いことを示すことが可能となった。

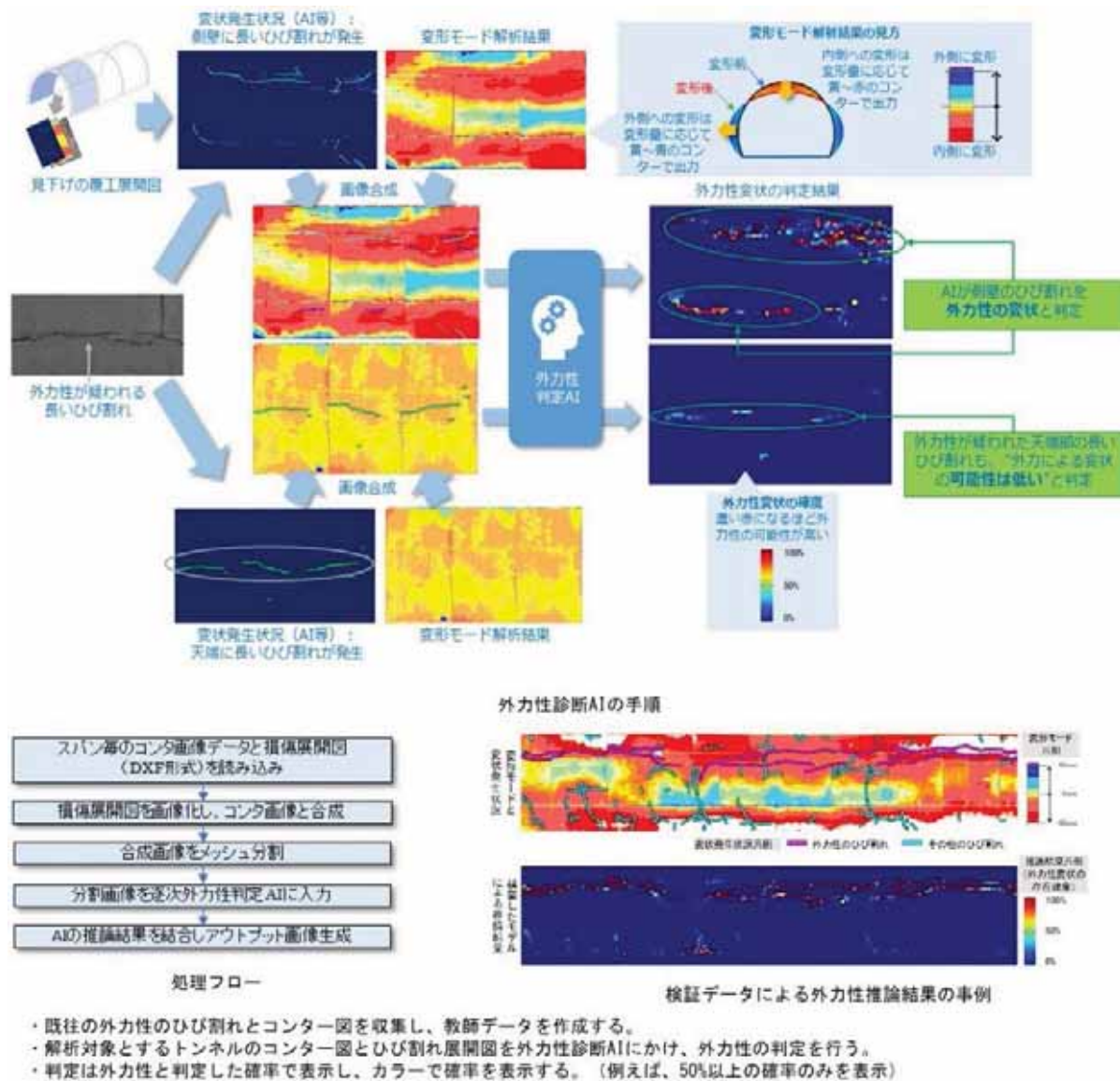


図 3-33 外力性診断 AI の概要

6) 適応条件

A) 採否の検討のための条件

- ・ 車両通行が可能な道路トンネル
- ・ 最高速度(計測時, 非計測時共) 80km/h 最大耐風速: 30m/s (自転車速度による風圧含)
- ・ 周囲温度: 0~+40°C (動作時), -20~+60°C (非動作時) 直射日光を避けて保管する。
- ・ 振動衝撃 振動 2-8Hz: 10mmp-p, 8-50Hz: 12.75m/s² 衝撃 39.2m/s², 11ms (半正弦波)

B) 精度と信頼性に関する留意点

機器精度および信頼性に関する留意点は以下のとおりである。

- ・ 機器計測精度は下記の条件により異なる。対象としている計測の目的に応じて、精度評価を行う必要がある。

表 3-6 要因に応じた誤差一覧

	現有MMS
測量機器(レーザ)の誤差	プロファイラー Z+F 9012 代表値：±1.68mm ^{注1}
システム測量誤差(2点間)	±2mm程度 ^{注2}
絶対座標系(世界測地系)誤差	10cm程度
相対座標としての差分誤差	0.5~2mm程度
検証用トータルステーション測量誤差	1~2mm程度 (最も精度の良いTS 0.5mm)
衛星不可視下	不可視時間、距離により 数10cm~数m誤差

施工総合技術研究所の実物大の模擬トンネルを用いて試験

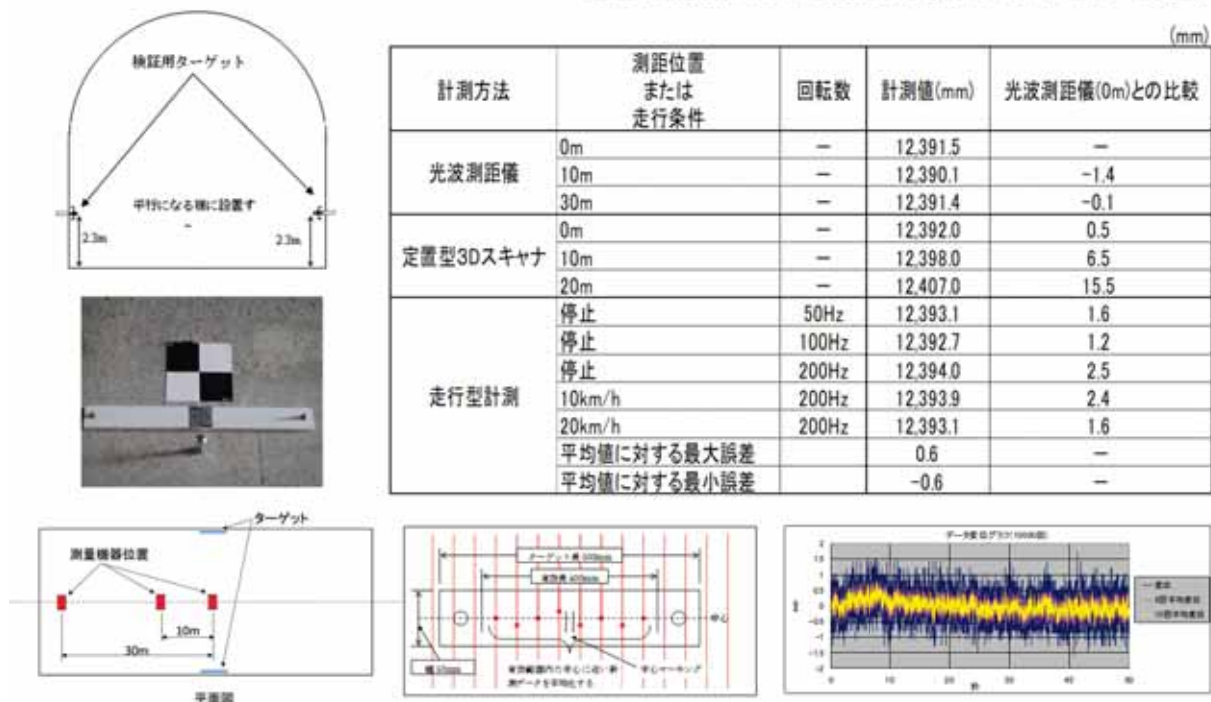


図 3-34 レーザ計測試験結果⁹⁾

(3) 走行型レーダ計測（巻厚計測および背面空洞計測）

1) 概要

従来トンネルの覆工巻き厚及び空洞厚の探査には、接触型レーダを使用して実施している。接触型レーダ探査装置は、トンネル覆工にアンテナを接触させる必要があるため、トンネル内の附帯施設などに当たらないよう、交通規制を行い低速で実施する必要がある。

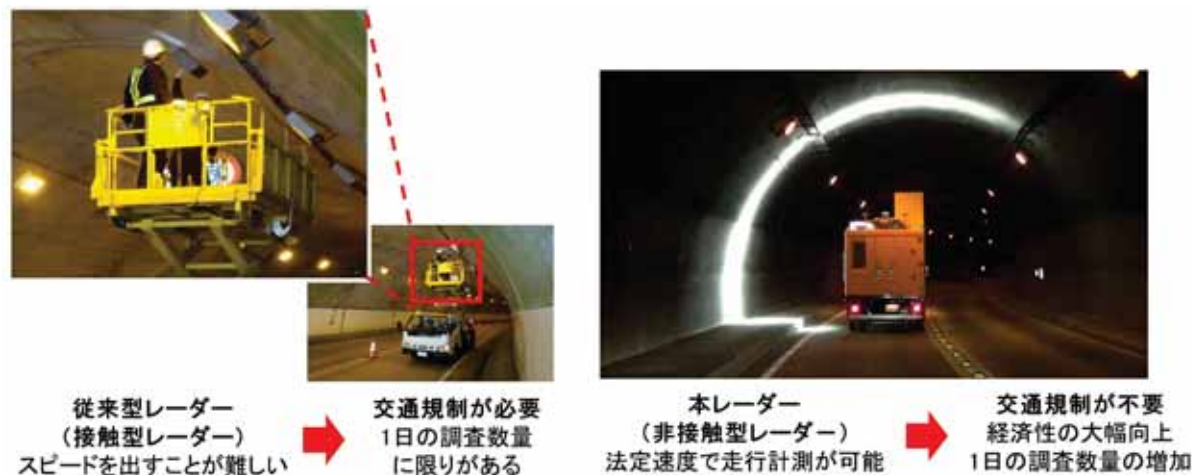


図 3-35 従来レーダとの比較

本システムは、接触アンテナの代わりに非接触アンテナを用いたため、50～70km/h で走行しながら、トンネル覆工の巻厚および背面空洞を計測する技術である。



図 3-36 アンテナ外景

2) 原理

地中レーダは、電磁波が比誘電率の異なる物質の境界で反射するという物理的性質を用いた間接調査法である。アンテナから放射されたパルスと呼ばれるごく短い電磁波が、構造物中に入射したあと、比誘電率の異なる層で反射され再びアンテナに戻って受信される装置である。放射された電磁波は、層境界で 100%反射するわけではなく、ある割合で反射波と透過波に分かれてそれぞれ進行する。

得られた反射時間と，電磁波の透過波速度から層厚を算出する．

電磁波を照射→層境界で反射（反射が発生した時間を計測）→電磁波の透過速度から各層の厚みを算出する．

表 3-7 探査深度イメージ

		内部欠陥用	空洞探査用	一般接触レーダー
周波数		2000MHz	1000MHz	500MHz
1波長		15cm	30cm	60cm
アンテナ形状		ホーン型(非接触)	ホーン型(非接触)	ポウタイ型(接触)
探査深度 ※1	例1 コンクリートの場合	15cm	50cm	100cm
	例2 コンクリート+空洞の場合	コンクリート:10cm 空洞:15cm 計25cm	コンクリート:20cm 空洞:90cm 計110cm	コンクリート:50cm 空洞:150cm 計200cm
		各層構造・層厚により、探査深度が変化 		
※1) 電磁波は通過する層の物性により、探査深度は変化します。				
内部欠陥	分解能イメージ ※容積率による(約30%) 可否	細かい	中	粗い
		1cm程度	2cm程度	4cm程度
高速探査	理由	○	○	×
		指向性が有り感度が高いため離隔を取れる。	指向性が有り感度が高いため離隔を取れる。	指向性が無く感度が低い ため対象に接触させる必要がある。

A) 取得記録の解析

地中レーダ記録の解析は，反射波の強度と極性を基礎に行う．反射波の強度と極性は，下式(1)で表されるように，物質の比誘電率によって決まる．

$$\rho = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (1)$$

ρ : 反射強度 (強度と極性情報を含む)

ε_1 : 第1層目の比誘電率

ε_2 : 第2層目の比誘電率

また，記録から判読された記録紙上の層厚は，下式(2)によって実際の層厚に変換される．

$$\tau = \frac{C \cdot L}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2)$$

τ : 実際の層厚

C : 計測器固有の定数

L : 記録紙上の層厚

ε_r : 物質の比誘電率

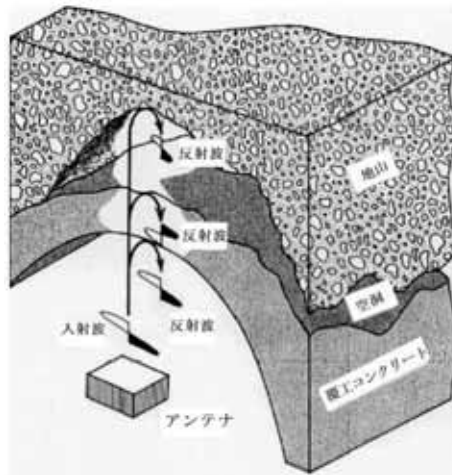


図 3-37 電磁波の反射状況⁹⁾

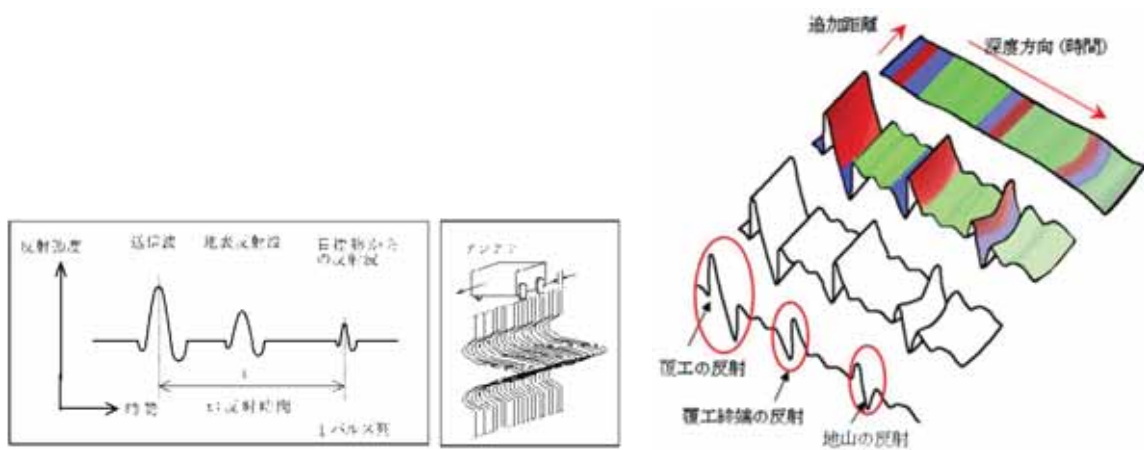


図 3-38 地中レーダ記録の概念図¹⁰⁾

(層境界で反射した時間を元に、電磁波の伝搬速度より各層厚を導出する)

3) 計測性能

表 3-8 空洞レーダ計測性能⁸⁾

項目	性能	性能(精度・信頼性)を確保するための条件
計測精度	検証の有無の記載 ※ 有	
	<p>【性能値】</p> <p>TYPE1:巻き厚・空洞レーダ コンクリート厚 40cm程度 誤差±5cm (コンクリートの場合の探査深度 45cm程度) 背面空洞: 誤差±10cm (コンクリート厚50cm以上の場合、背面空洞探査不可)</p> <p>TYPE2:内部欠陥レーダ 縦断5cm、横断1mのジャンカ、浮きなどの内部欠陥80%以上の 検出率で計測。探査深度20cm程度</p> <p>【標準試験】</p> <p>TYPE1:巻き厚・空洞レーダ</p> <p>[1] 表面近くの空洞 空洞厚30mm、被り10~50mmの場合、500×500mm以上で あれば検出可能 模擬空洞7か所中、2か所検出 検出率 28%、的中率 100%</p> <p>[2] 巻厚不足、鋼製支保工、背面空洞</p> <p>① 模擬巻厚不足の検出 40cm覆工厚に対し、20cmの巻厚、1か所を検出 検出率 100% 的中率 100%</p> <p>② 鋼製支保工 40cm覆工厚に対し、被り250mmで、H150の鋼製 支保工 11基を検出 検出率100%、的中率 100%</p> <p>③ 背面空洞 40cm覆工の背面空洞(空気)を検出 検出率100%、的中 率 100%</p>	<p>TYPE1:巻き厚・空洞レーダ 【確認シート参照】</p> <p>巻厚・空洞レーダは基本的に背面空洞探査を主目的としている。表層近くの空洞の場合は、規模が大きな空洞であることが条件となり、空洞厚30mm以上、空洞規模50cm程度以上であれば、探査可能となる。</p> <p>レーダアンテナから覆工壁面までの離隔は3m程度以下</p> <p>照明灯具、照明ケーブルなどの近傍は、電磁波が反射するため探査困難</p> <p>巻厚・空洞レーダの空洞探査深度は、45cm程度以下 覆工厚が50cm程度の場合、背面空洞は探査できない 覆工厚が45cm程度以下の場合、背面空洞の有無が確認できる。 覆工厚が20cm程度の場合、背面空洞厚が探査できる場合がある(例えば覆工20cmの場合、空洞厚が1m程度まで探査できる)</p> <p>【技術マニュアル参照のこと】 技術マニュアルは開発者が別途作成している。</p>

※ 「有」の場合は、性能確認シートを参照のこと

4) 調査要領

A) 調査に必要な機器・仮設備

MIMM-R に搭載して使用する場合は特に無し。

MIMM-R 以外で使用する場合には、離隔が 3m 以内になるような搭載車両、もしくはセンサを設置する治具。

電磁波の速度は不変なため、計測機のキャリブレーションは必要なし。センサを設置し電磁波の照射が確認されたら直ぐ計測となる。



図 3-39 使用車両の例

B) 事前準備から調査全体の流れ（調査フロー）

巻厚・空洞レーダの調査フローを図 3-40 に示す。

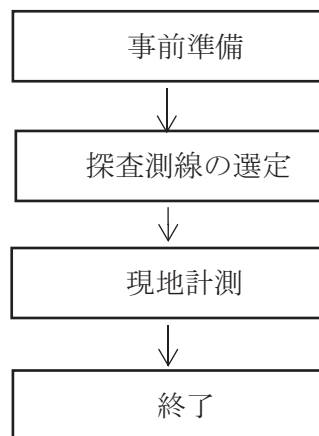


図 3-40 調査フロー

C) 調査手順

巻厚・空洞レーダによる調査の手順を以下に示す（前記調査フロー参照）。

①事前準備

トンネル基本情報，補修履歴の確認。

使用する車両を選定し，走行計画を策定する．一回に1測線しか取得出来ないため，複数測線を計測するためには，必要測線数走行する．安全に走行するための転回場所などを事前に調査する。

②探査測線の選定

トンネル内部にある附属物，附带施設の位置を確認し，探査測線に重複しないよう測線の選定を行う。

③現地計測

走行計画を元に、図 3-41 走行イメージに示す通り、必要数走行する。



図 3-41 走行イメージ

取得記録を元に解析を行い、図 3-42 出力イメージに示すような、1 m ごとの巻き厚・空洞厚を図化する。

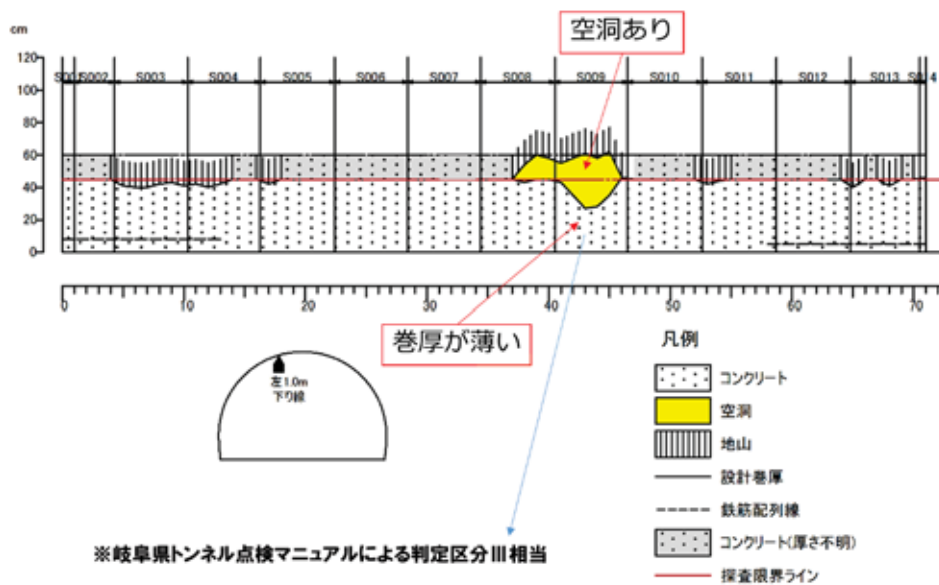


図 3-42 出力イメージ

5) 適用条件

A) 採否の検討のための条件

従来の地中レーダ探査と同様に、表面が誘電体で覆われている場所（炭素繊維シート・

内巻鋼板など)は探査不可能である。

また、RC 構造は配筋ピッチが密であると、覆工表面から鉄筋までの情報しか得られない。

裏込め材の有無、ウレタン系の注入剤の場合、空洞との判別ができない。

B) 精度と信頼性に関する留意点

①機器精度に関する留意点

探査測線に、金属物が多いと得られる情報が少なくなる。

②精度と信頼性に関する留意点

非接触アンテナのため、拡散と減衰が大きく、探査可能深度が、コンクリートのみでは45cm までと制限される。ただし、巻き厚が薄く空洞が存在する場合にはより深い深度まで探査可能である。この概念を表 3-7 探査深度イメージに示す。

図 3-43 精度検証結果 1 に示す通り、接触型レーダとの対比において、1 m ごとの解析結果を比較すると、覆工厚が 45cm 未満の箇所に関しては、相関係数 0.9 と同等の結果が得られ、覆工厚が 45cm 以上の場所に関しては巻き厚・空洞厚とも検出は困難である。また、取得した記録の対比を図 3-44 精度検証結果 2 に示す。

地中レーダは、ある一定の面(使用するセンサに依存)による探査のため、対象が平滑の場合、誤差は比誘電率の個体差程度であり、殆ど発生しない。ただし、覆工背面のように平滑ではない場合、背面の凹凸程度の誤差が発生する。既存調査結果より、±5 cm 程度。また、背面空洞は、凹凸の影響が2面(覆工背面、地山面)となるため、±10 cm 程度は発生する。

【接触型レーダーとの比較検証結果】

- 覆工巻厚が45cmにおいては、検出精度が高い(相関係数0.9程度)
- 覆工巻厚45cm以上では、巻厚/空洞値検出困難。

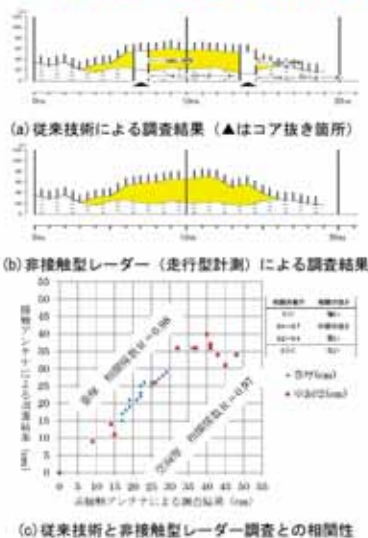


図-4 Hトンネルにおける検証結果

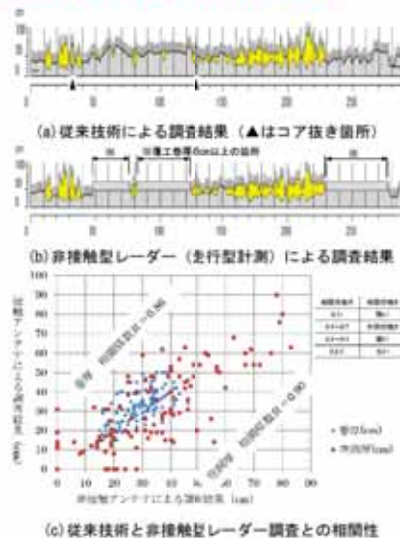


図-5 Sトンネルにおける検証結果

- 巻厚45cm超
- 照明器具近傍
- 目地近傍の小規模な空洞
- 配筋が密なRC覆工区間

図 3-43 精度検証結果 1

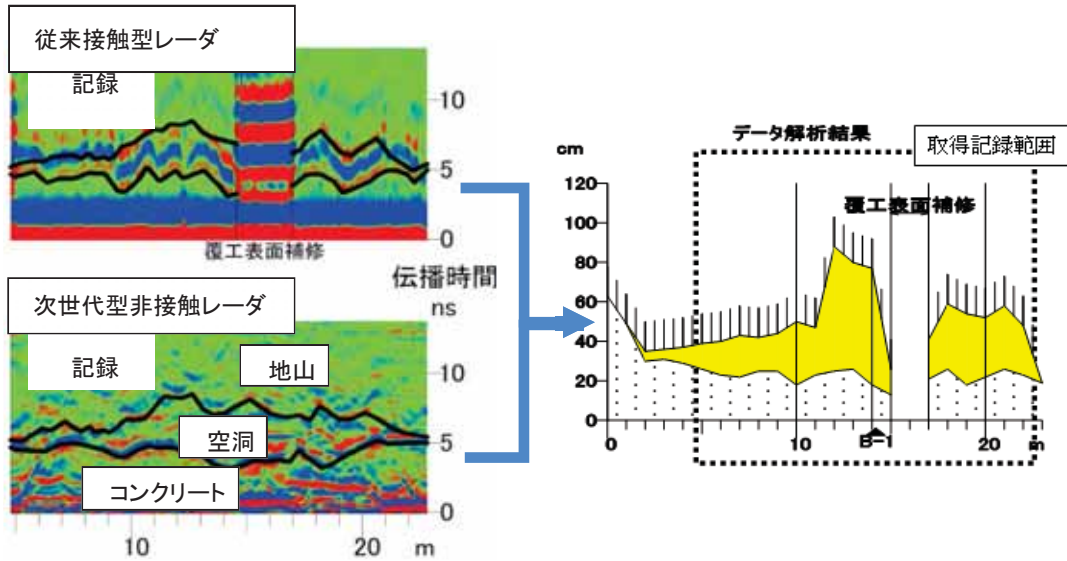


図 3-44 精度検証結果 2 (取得記録データの比較)

6) 調査結果の解釈の留意点

トンネル空洞調査を行う場合には、理論的に正しい解析を行わなければならない。曖昧なパターン認識法ではなく、反射波の強度と極性から理論的判定を行い、空洞の有無と厚さをより正確に導出する必要がある。

7) 記録

調査の記録として残すべき基本事項は次のとおりである。

- ① 対象トンネル名
- ② 調査延長、及び横断方向の計測位置
- ③ 巻厚、空洞の数値データ
- ④ 巻厚、空洞の側線方向の図面
- ⑤ 必要に応じて巻厚、空洞の 3 次元表示および 2 次元展開図面

(4) 走行型レーダ計測（内部欠陥計測）

1) 概要

現在、接触式地中レーダを用いたコンクリート内部欠陥検知技術は確立しており、実用に供している。しかし、接触式地中レーダは交通規制を必要とし、円滑な交通の障害となる。内部欠陥レーダは、交通規制を伴わずに内部欠陥を検知するために、非接触式地中レーダ装置を使用した。

本技術は非接触レーダ装置を用いて、対象までの離隔 3 m で高速走行を行い、縦断方向に 5cm、横断方向に 1 m の範囲内で発生している内部欠陥を検出する技術である。



図 3-45 内部欠陥レーダ

2) 原理

一般的に使用されている地中レーダはパルス信号を照査し、層境界で発生する反射を記録して、技術者が解析作業を行い、層構造を判断している。本内部欠陥レーダは、航空レーダに近い性質を持ち、覆工表面から、深度 20cm までの間に、異常箇所（前後と異なる物）の有無を検出するものである。

アンテナ部は遠距離用 1 つと、近距離用 2 つの合計 3 つのアンテナから構成される。送受信部は FM-CW 方式のレーダであり受信信号をデジタル化して信号処理部に送る。また、送受信部は搭載車両から位置変化を表すエンコーダ信号を得て、デジタル化した受信信号に付す。

信号処理部はパソコンである。ここでは、送受信部の得た受信データ等処理して壁面部からの反射信号を求める。また、受信データ等の記録機能と表示・制御機能を持ち、処理結果の表示と機器と処理の制御を行う他、収録したデータを再生・処理する。信号処理は、最初に不要信号抑圧処理で受信データに含まれる送受アンテナ間の回り込み信号成分と壁面からの反射信号成分を抑圧する。次いで、合成開口処理により、車両の進行方向に広がった同一反射点からの信号を一点に集める。移動方向平均値算出処理、設定値乗算処理、引算処理はレーダの移動方向に広がる信号成分を抑圧する処理である。抑圧の度合いは設定値乗算処理で移動方向平均値に乘ずる値を変えることで調整する。

合成開口処理のイメージ

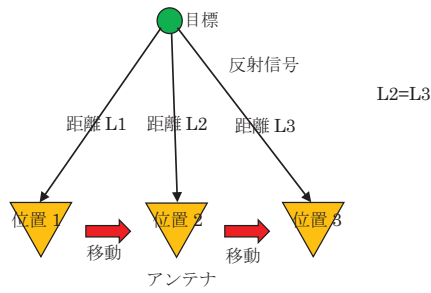


図 3-46 合成開口レーダの模式図

図 3-46 に合成開口レーダの模式図を示す. 図 3-46 のようにアンテナを位置 1 からスタートし位置 3 まで移動させる. この時, 目標からの反射信号は, 距離 $L1$, $L2$, $L3$ と変化する.

※) レーダでは目標からアンテナまでの距離のことをスラントレンジと呼ぶ.

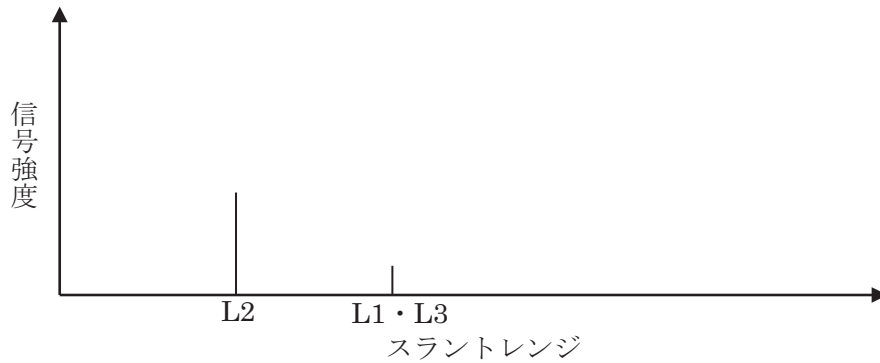


図 3-47 図 3-46 の時のレーダの受信信号

図 3-47 は図 3-46 の位置 1, 2, 3 の時のレーダの受信信号を示す. 図 3-47 で $L2$ より $L1 \cdot L3$ の強度が弱いのはスラントレンジが遠いので電波が広がって受信強度が下がっているためである.

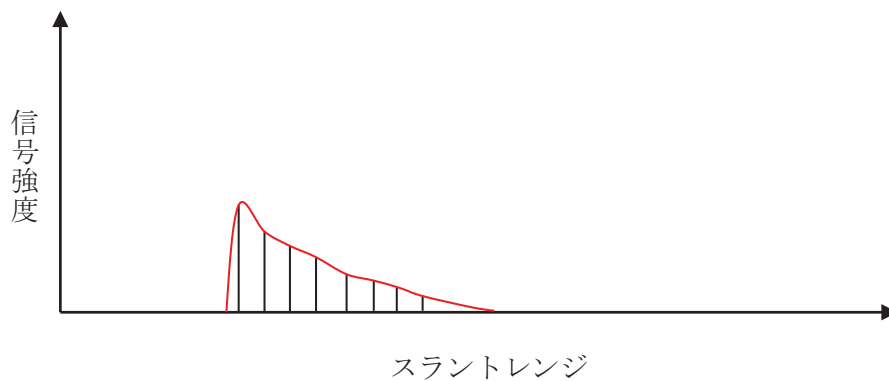


図 3-48 測定点を増やし足し合わせた結果

図 3-48 は位置 1, 2, 3 以外の測定点も増やした結果である。赤色の線は測定結果を全て足し合わせて合成した結果である。同図で分かるように単純に合成しただけではスラントレンジ方向に信号が広がってしまう。

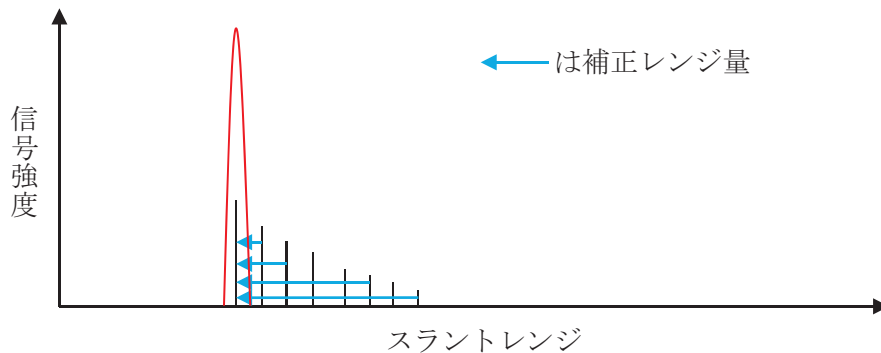
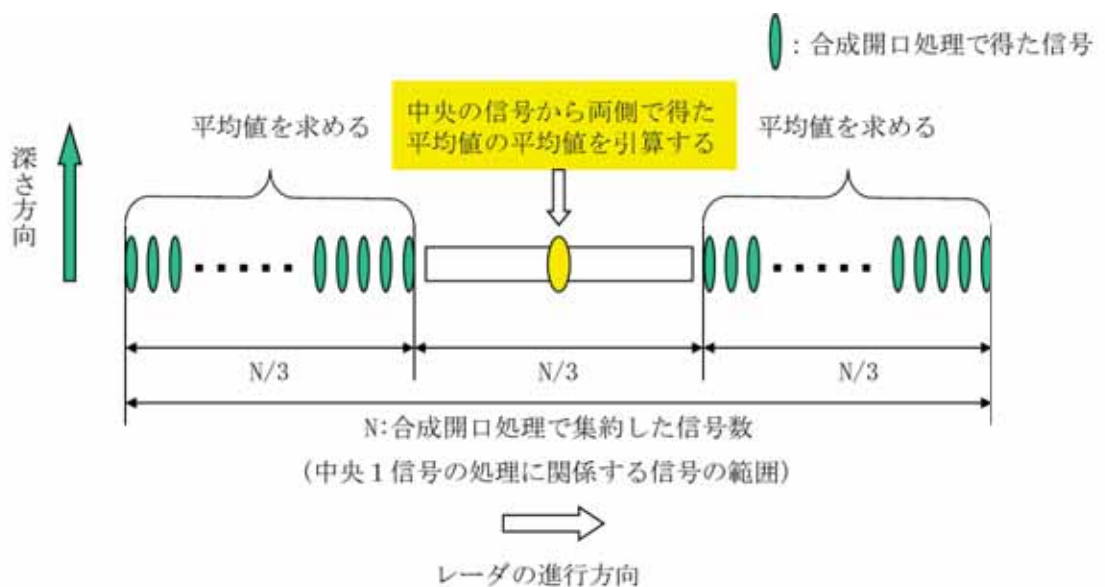


図 3-49 補正レンジ量だけ信号を移動し足し合わせた結果

図 3-49 は、図 3-48 の各測定点の結果を補正レンジ量だけ移動し足し合わせた結果である。補正レンジ量はアンテナの位置から算出することが出来る。図 3-48 と図 3-49 を比較するとレンジを補正して合成すれば目標の位置が一点に絞られ、更に大きな信号を得られることが分かる。



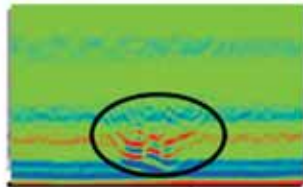
注：○引算する信号に乗ずる値(倍率)を変えることで除去する信号の大きさを変える
 ○本処理は全深さ方向の信号について行う
 ○引き算処理は、合成開口後のIQデータを振幅に直してから行う。
 振幅の計算は

$$\text{振幅} = \sqrt{I^2 + Q^2}$$
 となっている。

図 3-50 引算処理イメージ

■内部欠陥点検の分解能

内部欠陥検出例

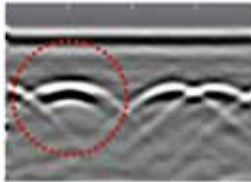


3m範囲で発生している
内部欠陥

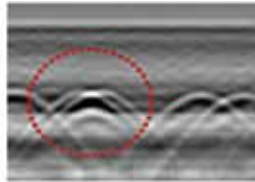
巻厚・空洞厚探査用非接触レーダでも規模が大きい
内部欠陥の検出は可能(実績)

	高周波帯	中周波帯	低周波帯
周波数	1000MHz以上	900～300MHz	300MHz以下
探査深度 (※状況により異なる)	～0.3m程度	～1.0m程度	～1.8m程度
鉄筋がある場合 ※周波数と鉄筋径による	100mm以上の間隔であれば探査可能	300mm程度の間隔であれば探査可能	500mm以上の間隔であれば探査可能
深さイメージ	浅い		深い
分解能イメージ	細かい		荒い

中周波



高周波



中周波では1本に見える鉄筋が
高周波にすると、近接して2本ある
事がわかる。

高周波により、分解能が上がる

図 3-51 解像度

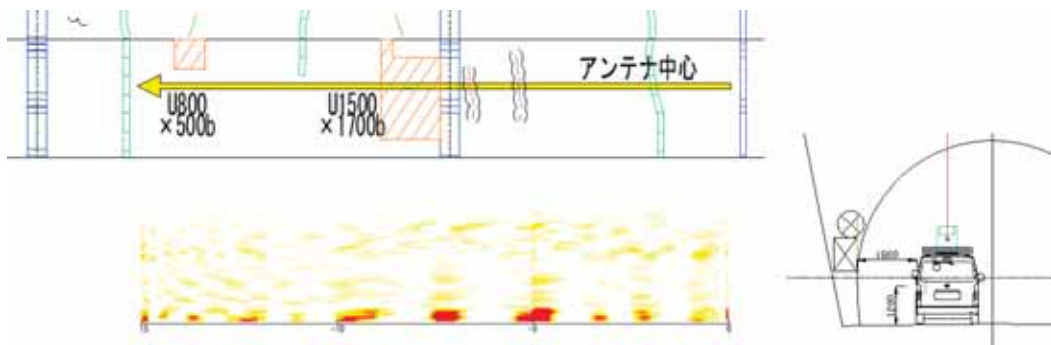


図 3-52 計測結果事例

3) 計測性能

表 3-9 内部欠陥レーダの計測性能⁸⁾

項目	性能	性能(精度・信頼性)を確保するための条件
計測精度	検証の有無の記載 ※ 有 【性能値】 TYPE2:内部欠陥レーダ [1] 表面近くの空洞 非接触レーダであり、空洞の有無を探索する。小規模な模擬 うき(5cm×5cm)単体の検出は難しいが、探索範囲内に複数 ある事として検出可能 模擬空洞403か所中、403か所検出 検出面が広いため、検 出した範囲内に小規模なうきが複数個存在 検出率 100%、 的中率 100% [2] 表面近くの空洞(別テストフィールドにて実施:確認シート参 照) 空洞厚10mm、被り30mm、大きさ10cm×10cm以上であれば 検出可能 模擬空洞10か所中、8か所検出 検出率 80%、的 中率 100%	TYPE2:内部欠陥レーダ 【確認シート参照】 内部欠陥レーダは非接触で、レーダアンテナから覆工壁面ま での離隔は3m程度以下 照明灯具、照明ケーブルなどの近傍は、電磁波が反射する ため探索困難 非接触のため、探査幅は1m程度となり、小さな空洞単体の 位置を検出することはできず、空洞の有無を検出する 【技術マニュアル参照のこと】 技術マニュアルは開発者が別途作成している

※ 「有」の場合は、性能確認シートを参照のこと

4) 調査要領

A) 調査に必要な機器・仮設備

MIMM-R に搭載して使用する場合は、特に無し。

MIMM-R 以外で使用する場合には、離隔が 3m 以内になるような搭載車両、もしくは固
定・保持治具。

電磁波の速度は不変なため、計測機のキャリブレーションは必要なし。センサーを設置
し電磁波の照射が確認されたら直ぐ計測となる。

B) 事前準備から調査全体の流れ (調査フロー)

内部欠陥レーダの調査フローを図 3-53 に示す。

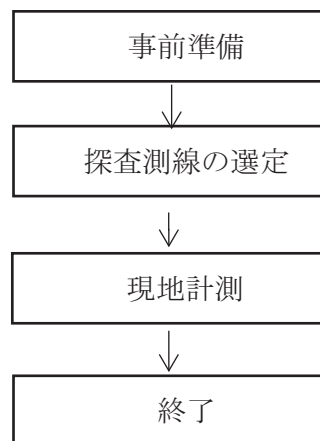


図 3-53 調査フロー

C) 調査要領

内部欠陥レーダによる調査の手順を以下に示す（前記調査フロー参照）。

①事前準備

トンネル基本情報，補修履歴の確認。

使用する車両を選定し，安全に走行するための転回場所などを事前に調査し走行計画を策定する。

②探査測線の設定

一回に天端からアーチにかけてデータを取得することができる。1個のアンテナで検出出来る範囲は，2m から 3m であり，調査を実施したい範囲になるようアンテナ角度の検討を行う。また，側壁を計測するためには，アンテナの付け替えを行う。

③現地計測



図 3-54 走行イメージ

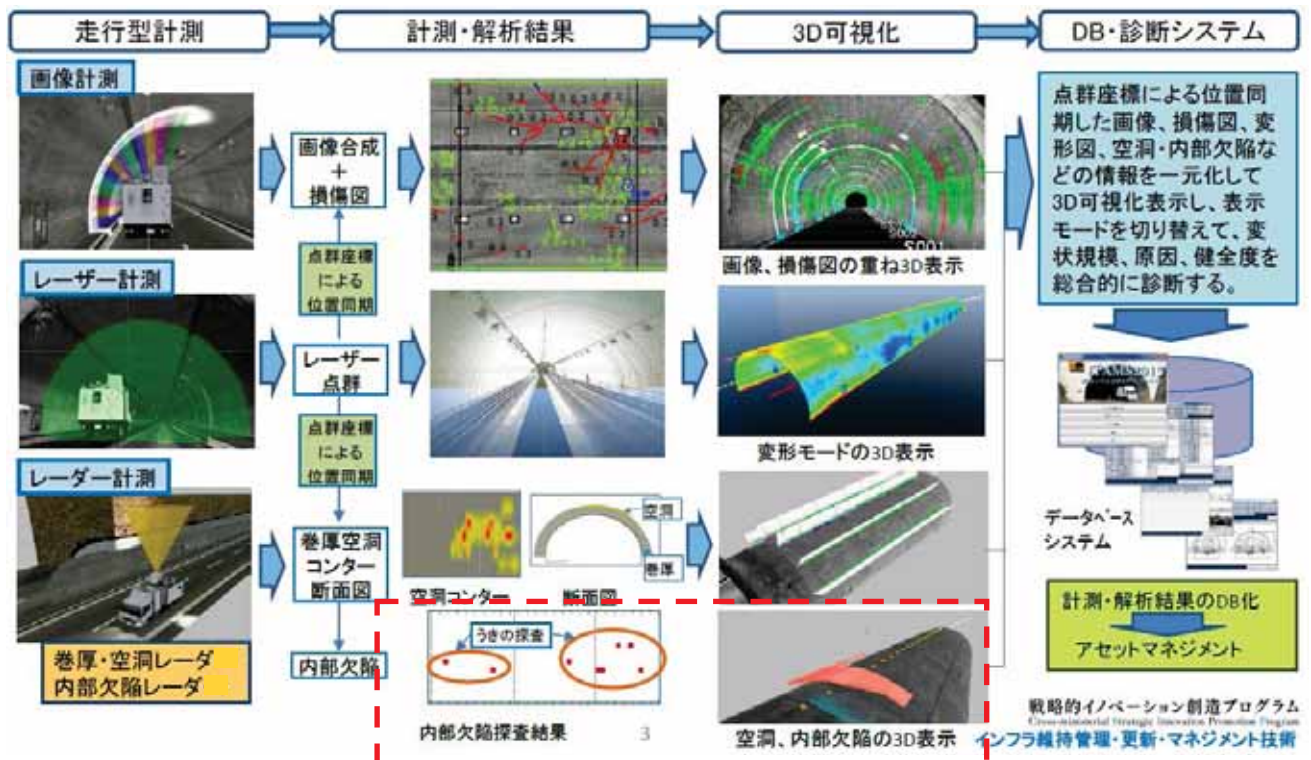


図 3-55 取得データイメージ

5) 結果の活用に関する技術情報

A) 取得記録の解析

本システムは、データを取得しながら、前後の変化を検出しており、基本的には、差異が発生した部分の位置が表示される。よって専門技術者の解析は不要である。

6) 適用条件

A) 採否の検討のための条件

従来の地中レーダ探査と同様に、表面が誘電体で覆われている場所（炭素繊維シート・内巻鋼板など）は探査不可能である。

合成開口処理を行うため、短距離及び渋滞などで等速の走行出来ない場合は困難である。

B) 精度と信頼性に関する留意点

①機器精度に関する留意点

探査測線に、金属物が多いと得られる情報が少なくなる。

②精度と信頼性に関する留意点

信号を増幅させ、周囲との差を確認するシステムのため、変状と附帯施設との区別が付かず、実際の変状より多めに検出される。

7) 調査結果の解釈の留意点

本システムは、電磁波照射範囲で、前後の変化を検出しており、内部欠陥だけではなく、附帯施設など、他と異なる場所が抽出されるので留意されたい。画像計測等と併用することで、附帯設備の抜粋が出来る。

8) 記録

調査の記録として残すべき基本事項は次のとおりである。

- ① 対象トンネル名
- ② 調査延長及び、計測実施範囲
- ③ 内部結果位置の表示
- ④ 内部欠陥の側線方向の図面
- ⑤ 必要に応じて内部欠陥の3次元表示および2次元展開図面

3.4.3 茨城県フィールド実証

(1) 目的

本検討は、茨城県が管理する朝日トンネル、山方トンネル、竜黒磯トンネルにおいて、走行型計測車両を用いたトンネル計測を行い、ロボットを活用した点検の効率化について検討するものである。

(2) 概要

- ① 名称 : 茨城県道路トンネル 走行型計測による効率化検討
- ② 業務箇所 : 朝日トンネル, 山方トンネル, 竜黒磯トンネル
- ③ 計測実施日 : 令和2年1月27日(月) 8:30~19:00
- 作業 者 : パシフィックコンサルタンツ株式会社

(3) 基本方針

道路トンネル定期点検において、H31.3改訂の道路トンネル定期点検要領⁴⁾では前要領同様に、近接目視を基本とすると定められている。一方で、所要の品質として、近接目視と同等の診断ができると点検を行う者が判断した場合は、その他の方法も近接目視を基本とする範囲と考えてよいと定められており、その判断が成り立つ場合は、ロボットによる計測をスクリーニングとして活用することが可能である。

一般に定期点検は効率化、コスト縮減、データベースの有効活用などの面で課題が残されており、ロボットを活用した定期点検の在り方を検討することが急務である。

そこで本業務では、下記の点を目的として効率化検討を行うものである。

【定期点検効率化に向けた課題解決】

・走行型計測車両により近接目視前に計測を実施し、スクリーニングを活用することにより、近接目視の効率化を図る。その結果からどの程度コスト縮減に寄与するかを検討する。

【3次元データベースの構築と有効活用】

・走行型計測手法は、画像計測のほかにレーザ計測による形状計測が可能であり、点群に基づく3次元モデルを構築し、正確な位置同期による画像合成、および変状位置取得が実現できる。この特性を活用し、変状情報を含む3次元モデルを構築し、診断の効率化や災害時の変状の早期把握に活用することを前提とした検討を行う。

・併せて、一般的に帳票は記録として整理されているが、作成コストがかかるだけでなく、変状把握、健全度診断、次回点検への活用などに十分に生かし切れていない側面も課題として残されている。従って、これらの課題に対してロボットを活用した3次元モデル、およびデータベース構築が有効であるかを検証する。

(4) 検討項目と数量

本業務の主な業務項目, 数量等を下表に示す.

表 3-10 業務項目一覧表

名称	規格	単位	数量	摘要
走行型計測		式	1	
現地計測作業				
走行型計測		m	2,305	
画像解析				
画像色調補正		m	1,021	
画像貼り合わせ		m	1,021	
ひび割れ変状抽出・展開図作成		m	1,021	
変形モード解析				
三次元座標変換処理		m	2,305	
変状コンター図作成		m	1,021	
変形モード解析		m	1,021	
レーダ探査解析		式	1	
変状展開図作成		m	1,021	
総合評価		m	1,021	
打合せ		式	1	3回

(5) 対象施設

表 3-11 点検対象施設一覧表

路線名	名称	所在地	延長	等級	工法	完成年
国道 118 号	山方トンネル	常陸大宮市	193m	C	矢板工法	1988 年
県道日立山方線	竜黒磯トンネル	常陸太田市	328m	D	NATM	1995 年
県道石岡つくば線	朝日トンネル	石岡市	1784m	A	NATM	2012 年

計測延長： 193+328+1784=2305m

画像合成・展開図作成延長：193+328+500=1021m / 朝日トンネル：終点方 500m

(6) トンネル概要

1) 山方トンネル

■トンネル台帳 【様式A-1】

フリガナ 名称	ヤマガタトンネル 山方トンネル		路線名	一般国道 118号線		管理者名	常陸大宮土木事務所		緊急輸送道路 代替路の有無	有り																						
所在地	自	茨城県常陸大宮市山方	作成者	大日本コンサルタント株式会社		作成年月日	2017年11月30日		トンネル延長	L= 193 m																						
	至	茨城県常陸大宮市山方	トンネル等級	C等級		トンネルの分類	陸上掘削工法																									
起点	緯度	36° 32' 07.04"	完成年月日	1988年3月1日		横壁	種別	コンクリート系		施設の内訳	個数	形式	更新年度																			
	経度	140° 31' 26.64"	供用年月日				厚さ	0.25 m			非常電話	2																				
終点	緯度	36° 32' 08.59"	トンネル等級	C等級		面積	1158 m ²		押ボタン式通報装置		4																					
	経度	140° 31' 31.35"	内装種類	薄工(内装なし)		更新年次	2011年		火災検知器		—																					
一般有料区分	無料		天井板種類	薄工(内装なし)		排水	種別	U型+暗渠排水		トンネル非常用施設	警報表示板	2																				
土かぶり	m		起点	形式	面壁型		更新年次	2011年			点滅灯	—																				
内空断面積	74.3 m ²		延長	0 m		施設	個数	158			更新年次	2011年																				
交通量	15 286 台/日		終点	形式	面壁型		照明	個数	158		更新年次	2011年																				
幅員	道路幅	14.4 m	坑門	工事巻厚	半径	占用物件	種類	寸法		管理者名	更新年次	その他	その他																			
	車道幅	6.5 m						アーチ	60 cm					換気	自然換気	—																
	歩道等幅	m						側壁	60 cm					標識	—	—																
	建築限界高	5.5 m						インバート	50 cm					警報表示板	—	—																
高さ	中央高	6.7 m	トンネル非常用施設	半径	アーチ	寸法	種類	寸法		管理者名	更新年次	その他	その他																			
	有効高	5.9 m						側壁	800 cm					吸音板	—	—																
	縦断勾配	下り0.607%						インバート	3001 cm																							
線形	直線区間長		トンネル非常用施設	半径	アーチ	寸法	種類	寸法		管理者名	更新年次	その他	その他																			
	曲線区間	区間長						—	トンネル非常用施設					半径	アーチ	寸法	種類	寸法		管理者名	更新年次	その他	その他									
		起点側クロノド						—										トンネル非常用施設	半径					アーチ	寸法	種類	寸法		管理者名	更新年次	その他	その他
		曲線半径						—																			トンネル非常用施設	半径				
終点側クロノド	—	トンネル非常用施設	半径	アーチ	寸法	種類	寸法		管理者名	更新年次	その他	その他																				
トンネル工法							上部半断面先進掘削・側壁導坑先掘削																									

■トンネル台帳 トンネル記録 【様式A-3】

フリガナ 名称	ヤマガタトンネル 山方トンネル		路線名	一般国道 118号線		作成者	大日本コンサルタント株式会社		作成年月日	2017年11月30日	
			管理者名	常陸大宮土木事務所							



平面図



トンネル断面積元



トンネル位置



現状写真(起点側: 水戸市側坑口)



現状写真(終点側: 大子町側坑口)

位置図、現状写真、標準断面図、地質断面図、施工実績

2) 竜黒磯トンネル

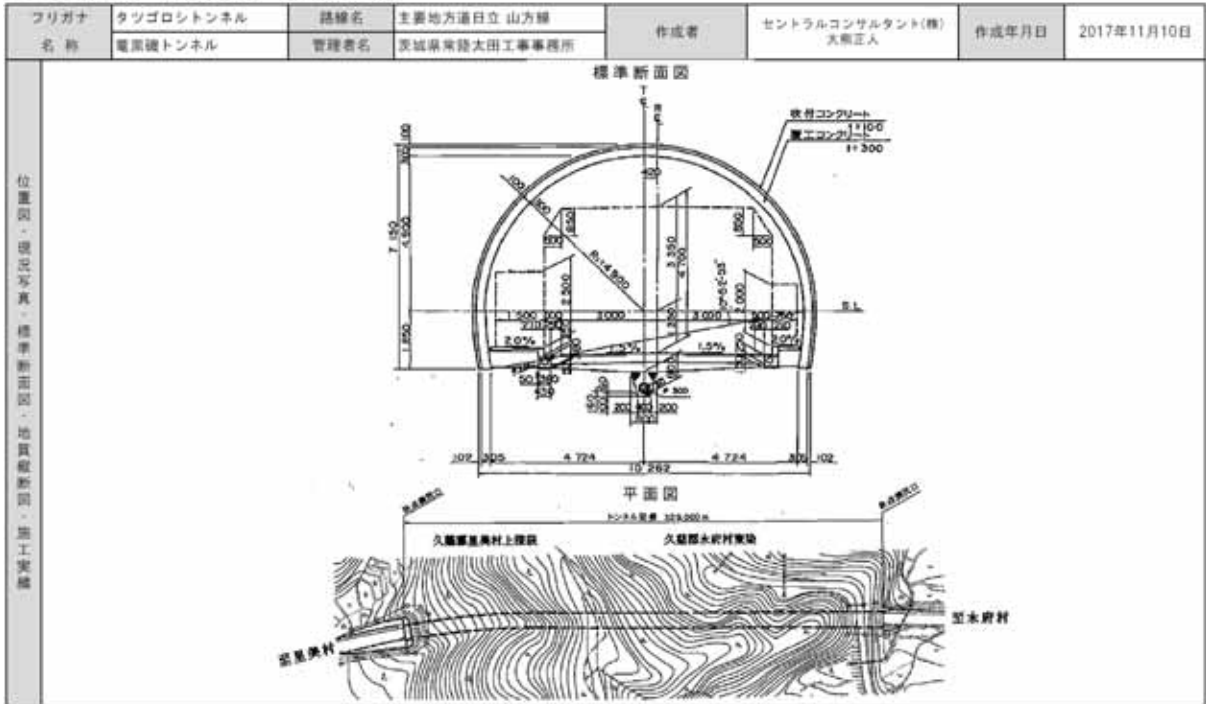
■トンネル台帳 【様式A-1】

フリガナ 名称	タツゴロシトンネル		路線名	主要地方道 日立山方線		管理者名	茨城県 常陸太田工事事務所		緊急輸送道路	第二次指定有り		
	竜黒磯トンネル			管理者名			常陸太田工事事務所		代替路の有無	有り		
所在地	自	茨城県常陸太田市 上原町	作成者	セントラルコンサルタン(株) 大熊正人		作成年月日	2017年11月10日		トンネル延長	L= 328 m		
	至	茨城県常陸太田市 奥津町		トンネルの分類			陸上トンネル-NATM工法					
起点	緯度	36° 39' 26.4"	完成年月日	平成7年		種別	コンクリート系		施設の内訳	回数	型式	更新年度
	経度	140° 31' 8.5"	供用年月日	不明			厚さ	0.25 m				
終点	緯度	36° 39' 29.3"	トンネル等級	D		更新年次	3034 m ²		非常電話	—		
	経度	140° 30' 55.0"	内装種類	無工(内装なし)			面積			押ボタン式通報装置	—	
一般有料区分	一般(無料)		天井板種類	無し		排水	種別	L型+暗渠排水		警報表示板	—	
土かぶり			坑門	起点	形式	面壁型	更新年次			点滅灯	—	
内空断面積	55.63 m ²			終点	形式	面壁型				音信号発生器	—	
交通量	3 083 台/24時間		竣工基準	延長	0.7 m	施設	照明	LED方式	回数	更新年次	消火設備	—
幅員	道路幅	9.25 m		形式	面壁型		トンネル非常用施設	換気	自然換気			消火栓
	車道幅	3.0 m	延長	1 m	標識	—				誘導表示板	—	
高さ	歩道等幅	1.5 m	側壁	アーチ	30 cm	警報表示板	—			排煙設備	—	
	建築限界高	4.7 m	インバート	0 cm	cm	吸音板	—			避難通路	—	
線形	中央高	6.25 m	半径	アーチ	490 cm					給水栓	—	
	有効高	4.7 m		側壁	980 cm					無線通信補助設備	—	
線形	縦断勾配	2.74%	占用物件	インバート	cm					ラジオ再放送設備	—	
	直線区間長			種類	寸法	管理者名	更新年次			拡声放送設備	—	
	区間長	12.5m				東京電力(株)				水噴霧設備	—	
	起点側クワッド	—								監視装置(I TV)	—	
曲線区間	曲線半径	500m							非常用電源設備	—		
終点側クワッド	—							非常駐車帯	—			
トンネル工法	NATMショートベンチカット工法								その他	方向転換所	—	

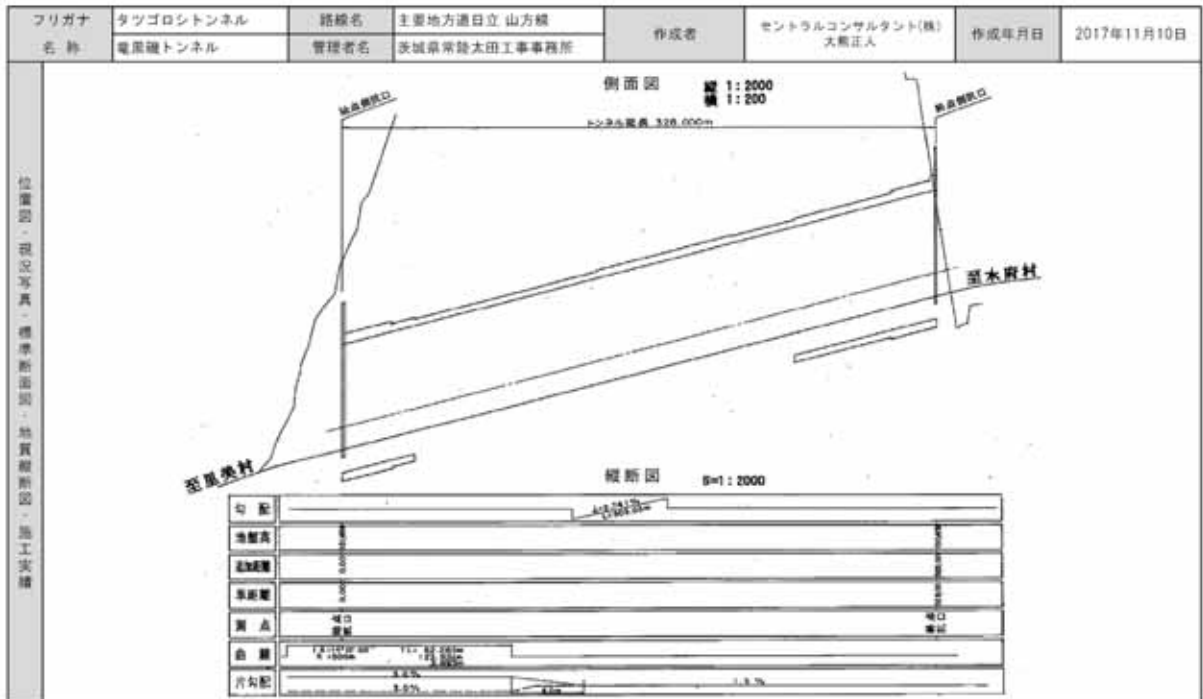
■トンネル台帳 トンネル記録 【様式A-3】

フリガナ 名称	タツゴロシトンネル		路線名	主要地方道日立山方線		作成者	セントラルコンサルタン(株) 大熊正人		作成年月日	2017年11月10日		
	竜黒磯トンネル		管理者名	茨城県常陸太田工事事務所								
位置図・ 現況写真・ 標準断面図・ 地質断面図・ 施工実績												
												
	位置図 - 現況写真 - 標準断面図 - 地質断面図 - 施工実績						<p>里美村(東、起点)側坑口写真</p> <p>水府村(西、終点)側坑口写真</p>					

■トンネル台帳 トンネル記録 【様式A-3】



■トンネル台帳 トンネル記録 【様式A-3】


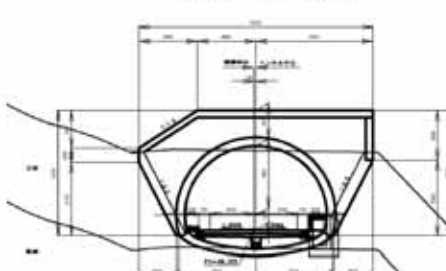





3) 朝日トンネル

■トンネル台帳 【様式A-1】

フリガナ 名称		アサヒトンネル 朝日トンネル		路線名	一般国道 石岡つくば線		管理者名	茨城県		緊急輸送道路 代替路の有無					
所在地		自	茨城県土浦市小野	作成者		サンコーコンサルタント株式会社		作成年月日		2018年2月1日					
		至	茨城県石岡市保内	完成年月日		平成24年11月		トンネル延長		L= 1784 m					
トンネルの分類		陸上トンネル矢張工法													
起点	緯度	36° 9' 55.66"		供用年月日				種別	コンクリート系		施設の内訳	個数	型式	更新年次	
	経度	140° 9' 54.84"		トンネル等級		A等級			厚さ	m		非常電話	11		
終点	緯度	36° 10' 52.73"		内装種類		標工(一部内装)		面積	10704 m ²		押ボタン式通報装置	36			
	経度	140° 9' 59.25"		天井板種類		なし			更新年次			火災検知器	—		
一般有料区分		一般(無料)		種別				種別				警報表示板	2		
土かぶり		m		更新年次				更新年次				点滅灯	—		
内空断面積		m ²		坑門				トンネル非常用施設				音信号発生器	—		
交通量		台/日		掘工事厚				照明		個数	更新年次	消火器	72		
幅員	道路幅	9.8 m		形式		面壁型		蛍光灯		112		消火栓	36		
	車道幅	3.3 m		延長		m		換気		自然換気	6	誘導表示板	17		
	歩道幅	0.8 m		側壁		cm		標識		—		排煙設備	—		
	建築限界高	m		アーチ		cm		警報表示板		—		避難通路	—		
高さ	中央高	6.0 m		インバート		cm		吸音板		—		給水栓	9		
	有効高	m		側壁		cm						無線通信補助設備	—		
線形	縦断勾配			インバート		cm						ラジオ再放送設備	—		
	直線区間長			種類		寸法		管理者名		更新年次		拡声放送設備	—		
	出線区間	区間長	—	—								水噴霧設備	—		
		起点側クワット	—	—								監視装置(CCTV)	—		
トンネル工法				—								非常用電源設備	1		
				—								非常駐車帯	2		
				—								方向転換所	—		

■トンネル台帳 トンネル記録 【様式A-3】

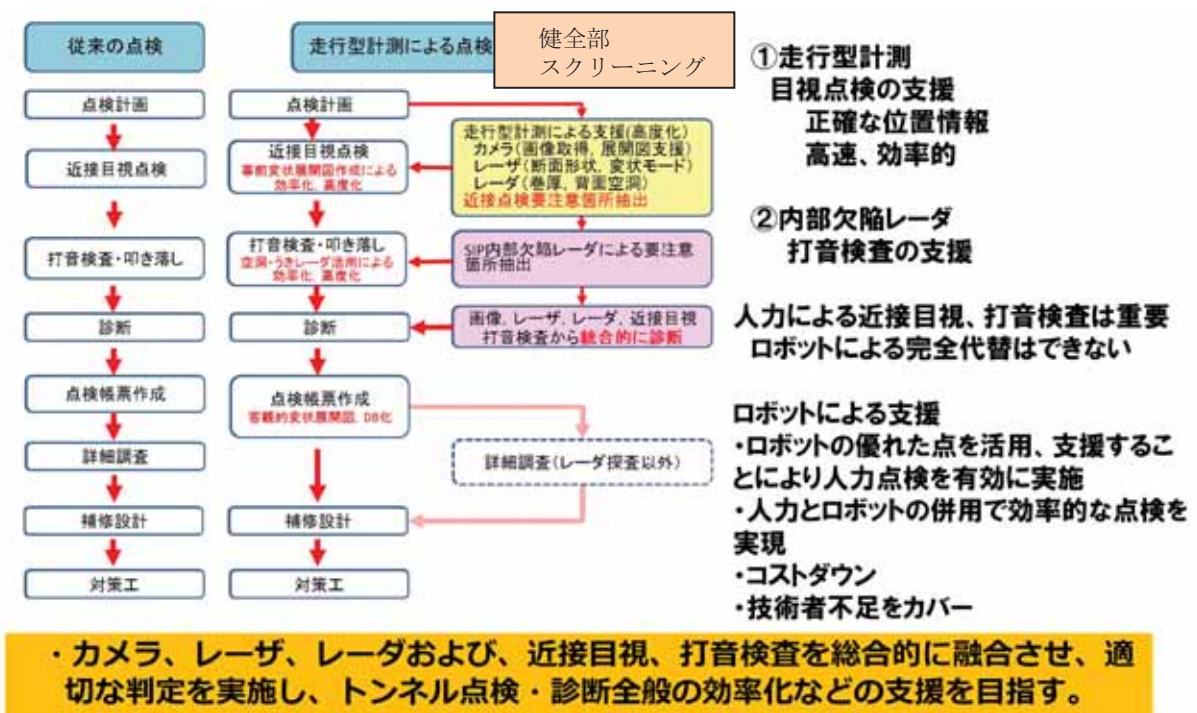
フリガナ 名称	アサヒトンネル 朝日トンネル		路線名	一般国道 石岡つくば線		作成者	サンコーコンサルタント株式会社		作成年月日	2018年2月1日	
位置図・現況写真・標準断面図・地質断面図・施工実績		<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>トンネル断面諸元 (起点側)</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>トンネル断面諸元 (終点側)</p>  </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;">  <p>位置図</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>現況写真(起点側)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>現況写真(終点側)</p> </div> </div>									

(7) トンネル計測結果

1) 走行型計測手法による判定支援

今回の走行型計測による点検において、業務概要に示したように、下記の課題解決を目的にしている。点検の効率化、合理化を進めるためには、特にスクリーニングを適切に行うことが重要である。問題箇所をスクリーニングにより抽出するという考え方もあるが、近接目視、打音検査を除外するための健全部のスクリーニングという考えもある。効率化、合理化、低コスト化を進めるためには、現場コストやスケッチ、帳票作成などのコストを低下させることがポイントになることから、健全部スクリーニングを適切に実施することが有効であると考えている。

走行型計測の効果的な運用方法としては、図 3-56 の点検の流れのとおり、近接目視の前に走行計測を実施し、健全部スクリーニングにより、近接目視と打音検査を実施する範囲を低減する方法が現実的である。また事前に画像から展開図を作成しておくことにより、近接目視点検時には、展開図の修正を行うことに集中すれば現場の点検時間、コストを低減させることが可能となる。



① 走行型計測
目視点検の支援
正確な位置情報
高速、効率的

② 内部欠陥レーダ
打音検査の支援

人力による近接目視、打音検査は重要
ロボットによる完全代替はできない

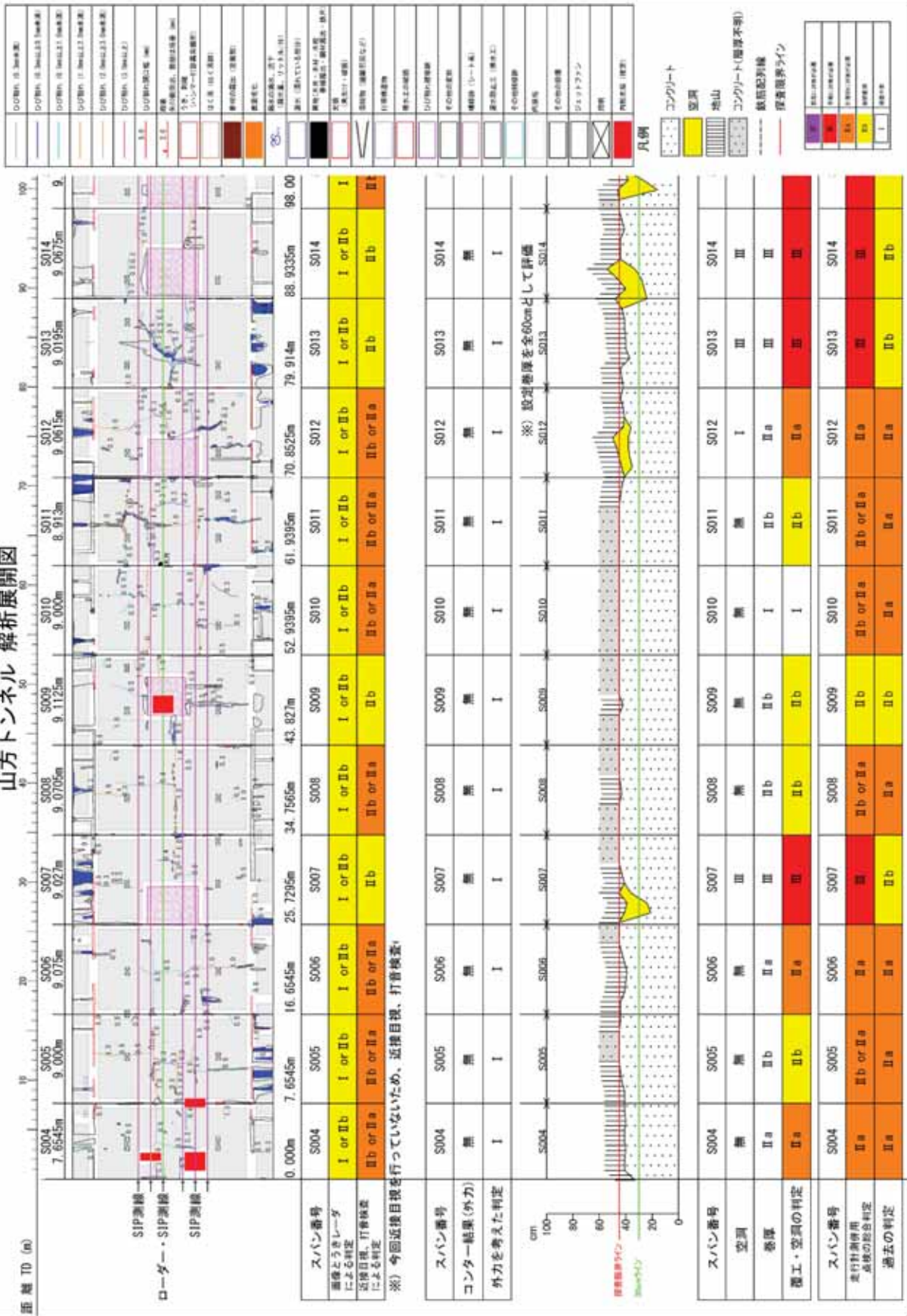
ロボットによる支援

- ロボットの優れた点を活用、支援することにより人力点検を有効に実施
- 人力とロボットの併用で効率的な点検を実現
- コストダウン
- 技術者不足をカバー

・カメラ、レーザ、レーダおよび、近接目視、打音検査を総合的に融合させ、適切な判定を実施し、トンネル点検・診断全般の効率化などの支援を目指す。

図 3-56 走行型計測による点検フロー

山方トンネル 解析展開図

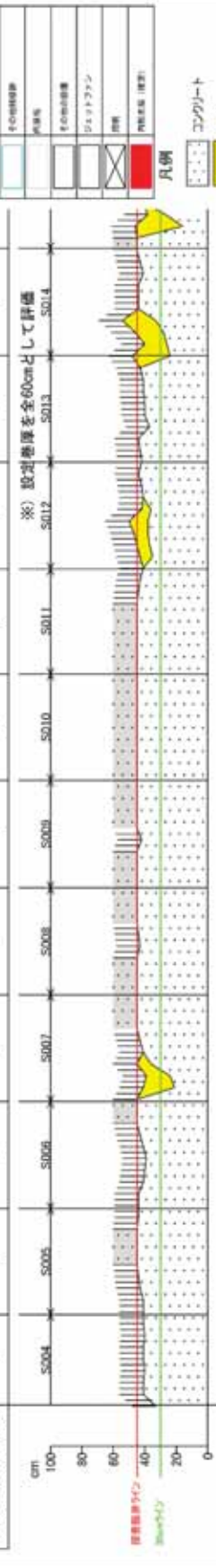


距離 TD (m)	S004	S005	S006	S007	S008	S009	S010	S011	S012	S013	S014
7.6545m	9.000m	9.075m	9.075m	9.027m	9.0705m	9.1125m	9.000m	8.913m	9.0615m	9.0195m	9.0675m
0.000m	7.6545m	16.6545m	25.7295m	34.7565m	43.827m	52.9395m	61.9395m	70.8525m	79.914m	88.9335m	98.000

スパン番号	S004	S005	S006	S007	S008	S009	S010	S011	S012	S013	S014
調査ようきレーザによる判定	I or IIb	I or IIb	I or IIb	I or IIb	I or IIb	I or IIb	I or IIb	I or IIb	I or IIb	I or IIb	I or IIb
近接目視、打音検査による判定	IIb or IIa	IIb or IIa	IIb or IIa	IIb	IIb or IIa	IIb	IIb or IIa	IIb or IIa	IIb or IIa	IIb	IIb

※) 今回近接目視を行っていないため、近接目視、打音検査!

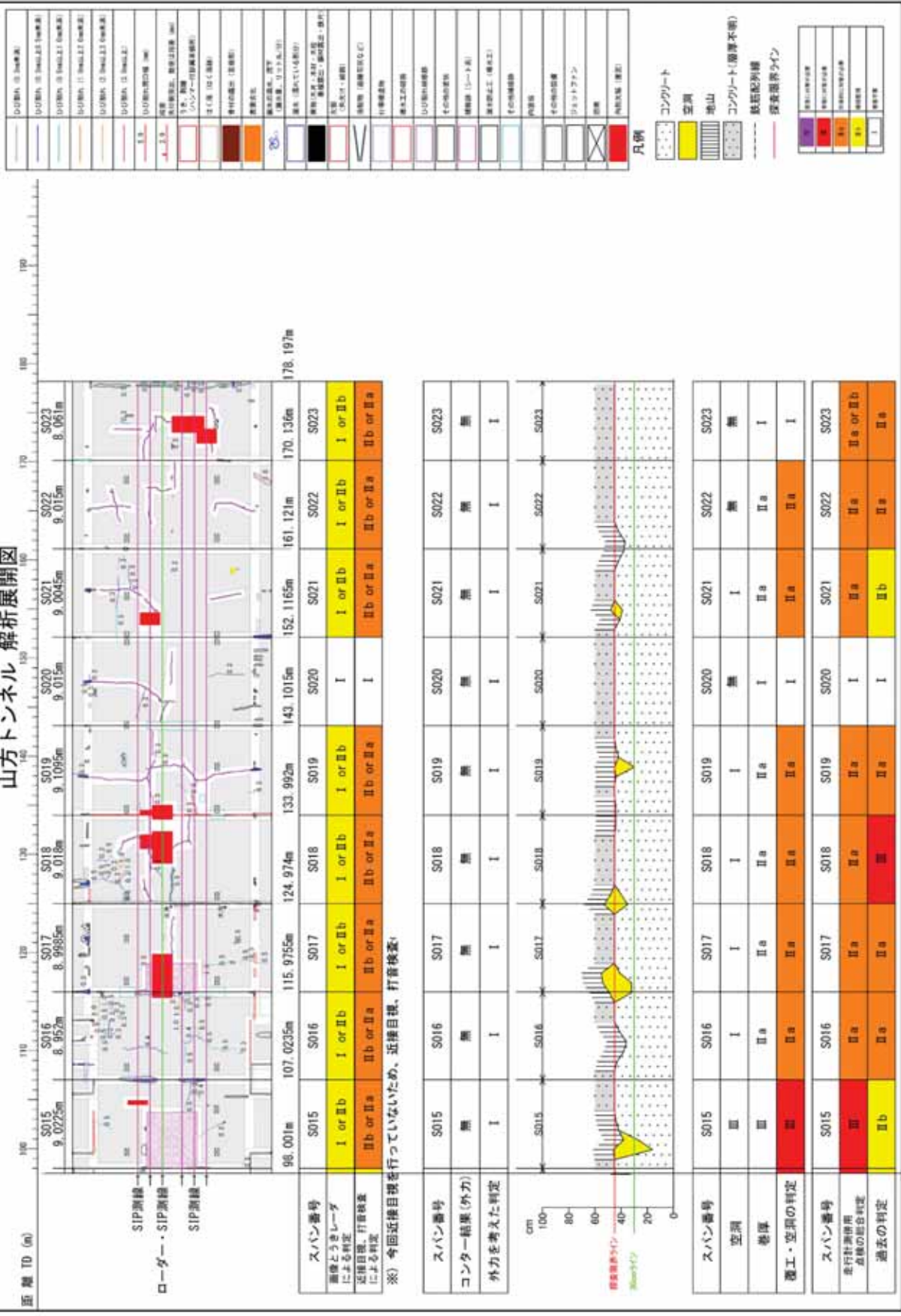
スパン番号	S004	S005	S006	S007	S008	S009	S010	S011	S012	S013	S014
コンタクト結果(外力)	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無
外力を考えた判定	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I



スパン番号	S004	S005	S006	S007	S008	S009	S010	S011	S012	S013	S014
空洞	無	無	無	III	無	無	無	無	I	III	III
巻厚	IIa	IIb	IIa	III	IIb	IIb	I	IIb	IIa	III	III
覆工・空洞の判定	IIa	IIb	IIa	III	IIb	IIb	I	IIb	IIa	III	III

スパン番号	S004	S005	S006	S007	S008	S009	S010	S011	S012	S013	S014
実行計画用	IIa	IIb or IIa	IIa	III	IIb or IIa	IIb	IIb or IIa	IIb or IIa	IIa	III	III
過去の判定	IIa	IIa	IIa	IIb	IIa	IIb	IIa	IIa	IIa	IIb	IIb

山方トンネル 解析展開図



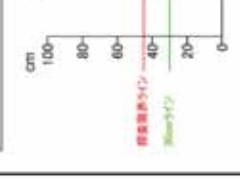
距離 TD (m)

SIP測線
ローダー・SIP測線
SIP測線

スパン番号	S015	S016	S017	S018	S019	S020	S021	S022	S023
画像とラダーによる判定	I or II b	I or II b	I or II b	I or II b	I or II b	I	I or II b	I or II b	I or II b
近接目視、打音検査による判定	II b or II a	II b or II a	II b or II a	II b or II a	II b or II a	I	II b or II a	II b or II a	II b or II a

※) 今回近接目視を行っていないため、近接目視、打音検査

スパン番号	S015	S016	S017	S018	S019	S020	S021	S022	S023
コンタクト結果(外力)	無	無	無	無	無	無	無	無	無
外力を考えた判定	I	I	I	I	I	I	I	I	I

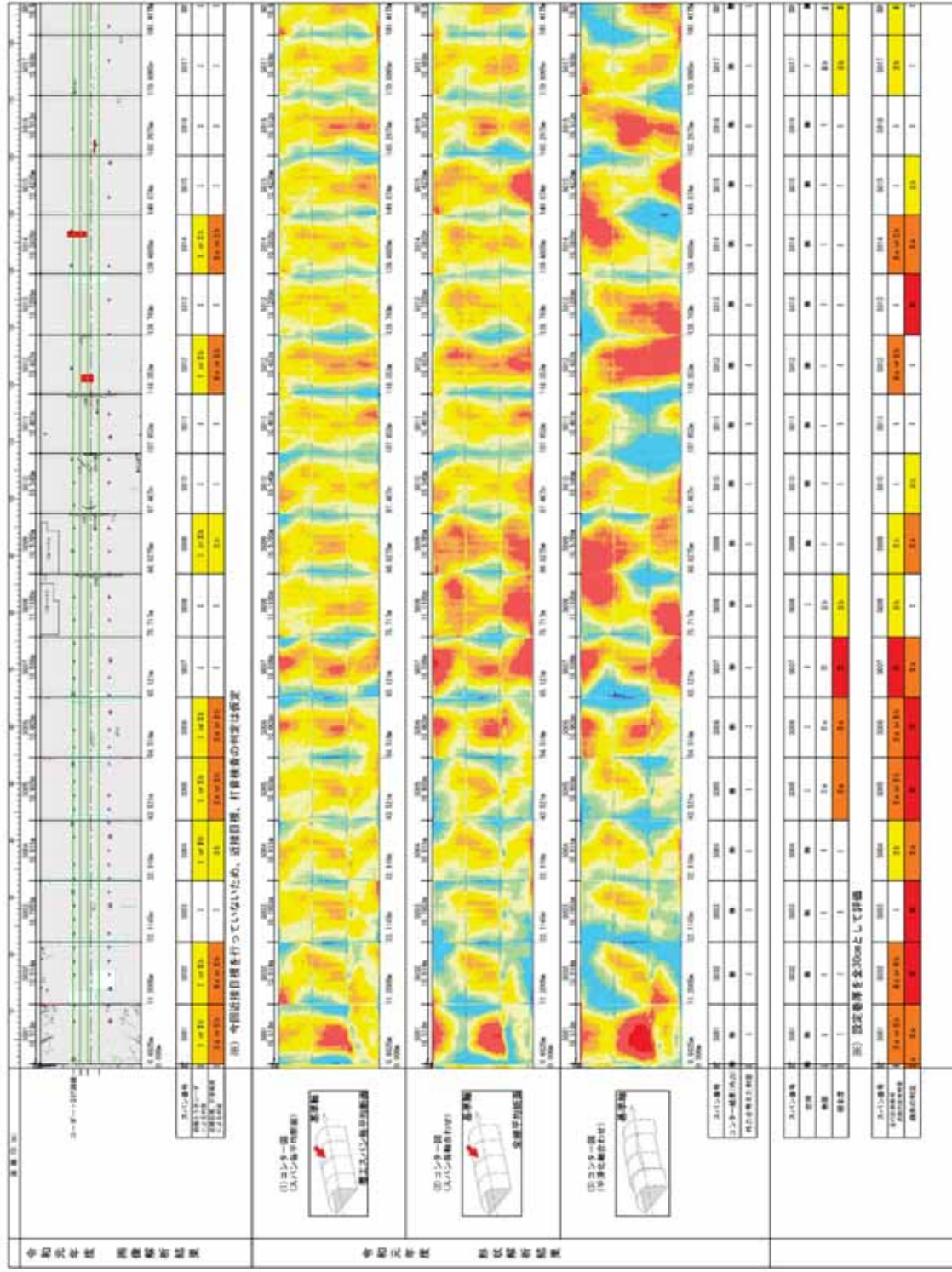


スパン番号	S015	S016	S017	S018	S019	S020	S021	S022	S023
空洞	無	I	I	I	I	無	I	無	無
巻棒	無	II a	II a	II a	II a	I	II a	II a	I
覆工・空洞の判定	無	II a	II a	II a	II a	I	II a	II a	I

スパン番号	S015	S016	S017	S018	S019	S020	S021	S022	S023
走行計測用点線の判定	無	II a	II a	II a	II a	I	II a	II a	II a or II b
過去の判定	II b	II a	II a	無	II a	I	II b	II a	II a

3) 竜黒磯トンネル

竜黒磯トンネル 解析展開図



①0.000m (3.00m未満)
②0.000m (3.00m以上 5.00m未満)
③0.000m (5.00m以上 10.00m未満)
④0.000m (10.00m以上 20.00m未満)
⑤0.000m (20.00m以上 30.00m未満)
⑥0.000m (30.00m以上 40.00m未満)
⑦0.000m (40.00m以上 50.00m以上)
⑧0.000m (50.00m以上)
⑨0.000m (50.00m以上)
⑩0.000m (50.00m以上)
⑪0.000m (50.00m以上)
⑫0.000m (50.00m以上)
⑬0.000m (50.00m以上)
⑭0.000m (50.00m以上)
⑮0.000m (50.00m以上)
⑯0.000m (50.00m以上)
⑰0.000m (50.00m以上)
⑱0.000m (50.00m以上)
⑲0.000m (50.00m以上)
⑳0.000m (50.00m以上)
㉑0.000m (50.00m以上)
㉒0.000m (50.00m以上)
㉓0.000m (50.00m以上)
㉔0.000m (50.00m以上)
㉕0.000m (50.00m以上)
㉖0.000m (50.00m以上)
㉗0.000m (50.00m以上)
㉘0.000m (50.00m以上)
㉙0.000m (50.00m以上)
㉚0.000m (50.00m以上)
㉛0.000m (50.00m以上)
㉜0.000m (50.00m以上)
㉝0.000m (50.00m以上)
㉞0.000m (50.00m以上)
㉟0.000m (50.00m以上)
㊱0.000m (50.00m以上)
㊲0.000m (50.00m以上)
㊳0.000m (50.00m以上)
㊴0.000m (50.00m以上)
㊵0.000m (50.00m以上)
㊶0.000m (50.00m以上)
㊷0.000m (50.00m以上)
㊸0.000m (50.00m以上)
㊹0.000m (50.00m以上)
㊺0.000m (50.00m以上)
㊻0.000m (50.00m以上)
㊼0.000m (50.00m以上)
㊽0.000m (50.00m以上)
㊾0.000m (50.00m以上)
㊿0.000m (50.00m以上)

トンネル内部に凸

トンネル内部に凸

①	トンネル内部に凸
②	トンネル内部に凸
③	トンネル内部に凸
④	トンネル内部に凸
⑤	トンネル内部に凸
⑥	トンネル内部に凸
⑦	トンネル内部に凸
⑧	トンネル内部に凸
⑨	トンネル内部に凸
⑩	トンネル内部に凸
⑪	トンネル内部に凸
⑫	トンネル内部に凸
⑬	トンネル内部に凸
⑭	トンネル内部に凸
⑮	トンネル内部に凸
⑯	トンネル内部に凸
⑰	トンネル内部に凸
⑱	トンネル内部に凸
⑲	トンネル内部に凸
⑳	トンネル内部に凸
㉑	トンネル内部に凸
㉒	トンネル内部に凸
㉓	トンネル内部に凸
㉔	トンネル内部に凸
㉕	トンネル内部に凸
㉖	トンネル内部に凸
㉗	トンネル内部に凸
㉘	トンネル内部に凸
㉙	トンネル内部に凸
㉚	トンネル内部に凸
㉛	トンネル内部に凸
㉜	トンネル内部に凸
㉝	トンネル内部に凸
㉞	トンネル内部に凸
㉟	トンネル内部に凸
㊱	トンネル内部に凸
㊲	トンネル内部に凸
㊳	トンネル内部に凸
㊴	トンネル内部に凸
㊵	トンネル内部に凸
㊶	トンネル内部に凸
㊷	トンネル内部に凸
㊸	トンネル内部に凸
㊹	トンネル内部に凸
㊺	トンネル内部に凸
㊻	トンネル内部に凸
㊼	トンネル内部に凸
㊽	トンネル内部に凸
㊾	トンネル内部に凸
㊿	トンネル内部に凸

竜黒磯トンネル 解析展開図

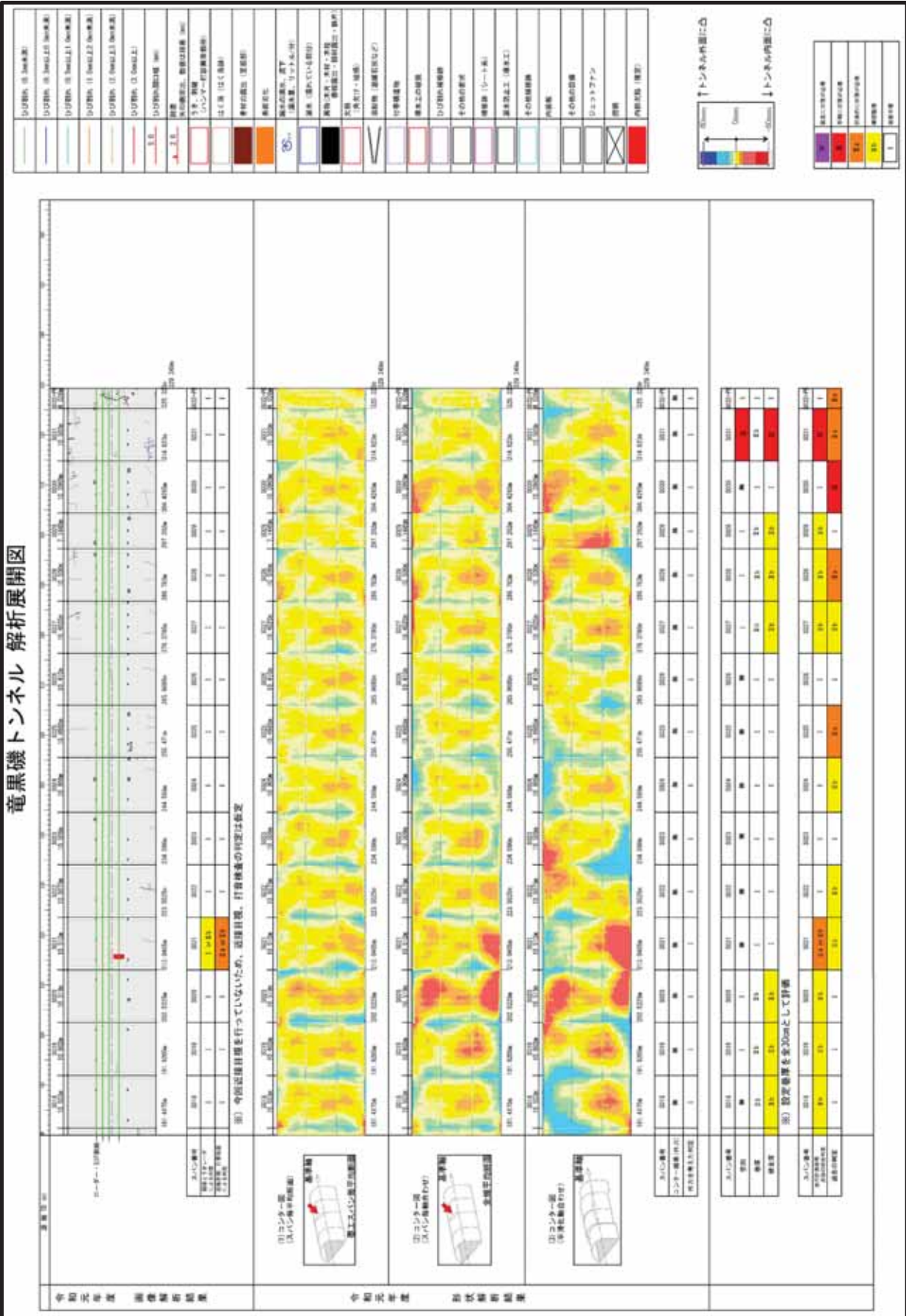
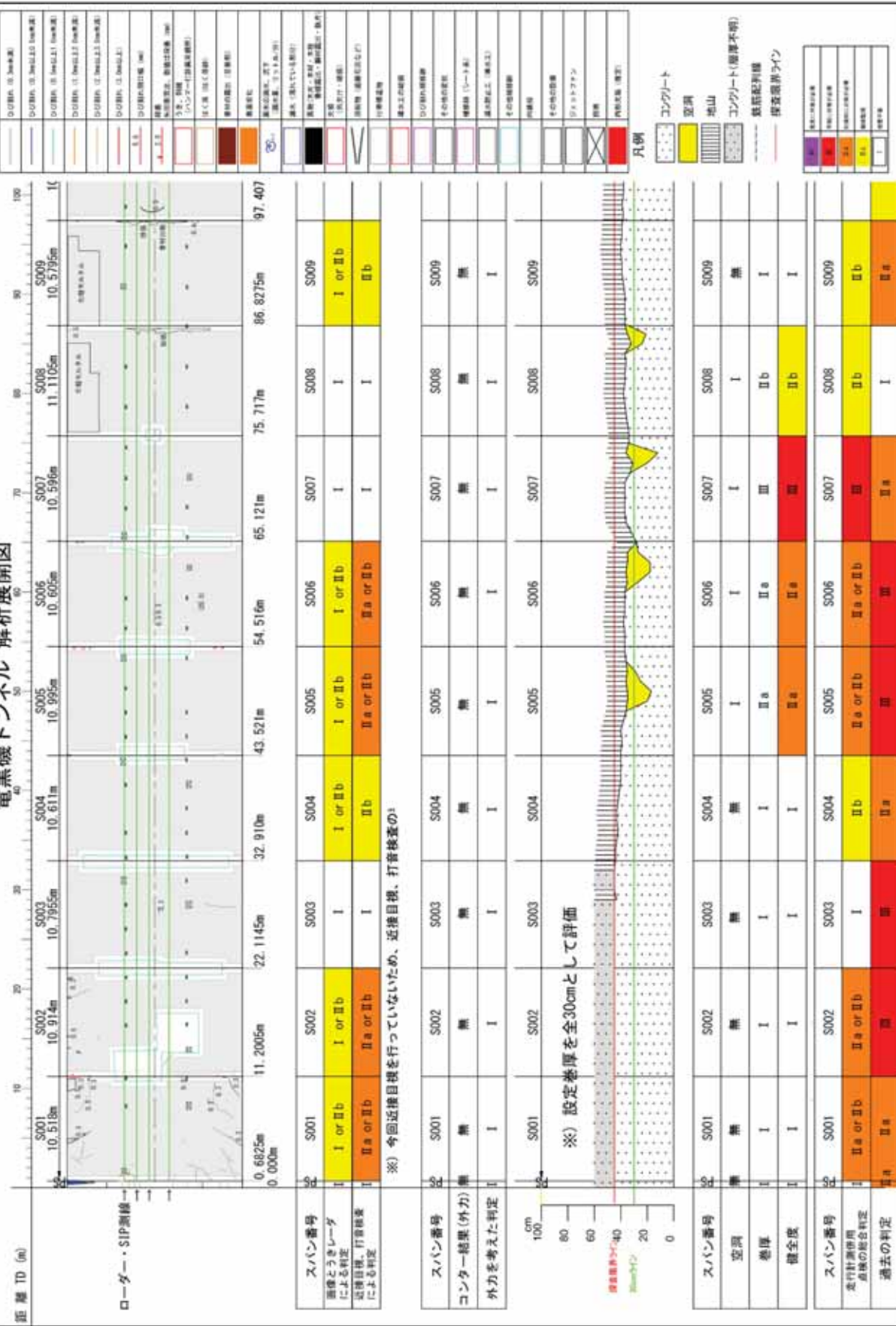
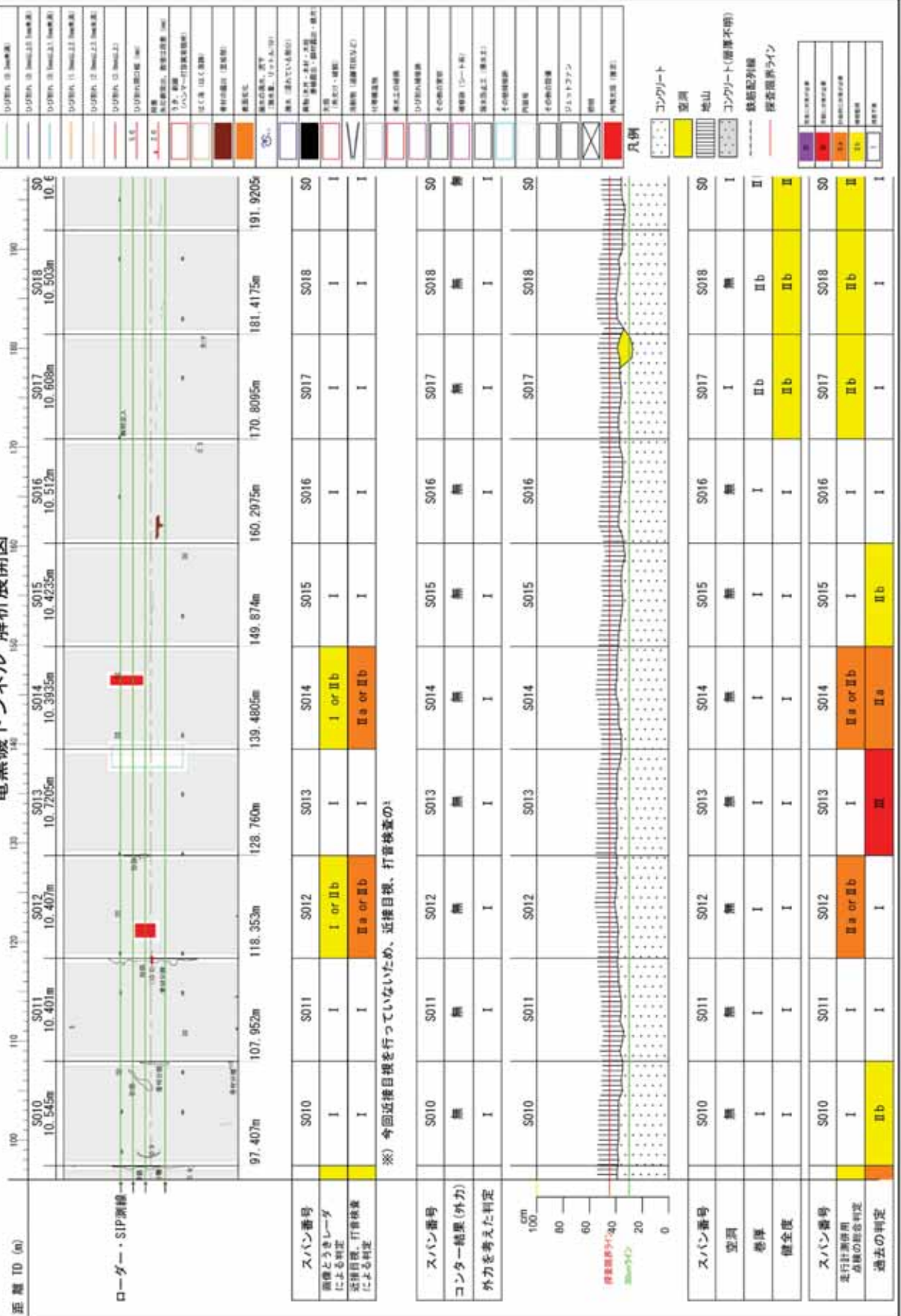


図) 今回図解目録を行っていないため、図解目録、打音機番の指定は省略

竜黒磯トンネル 解析展開図



竜黒磯トンネル 解析展開図

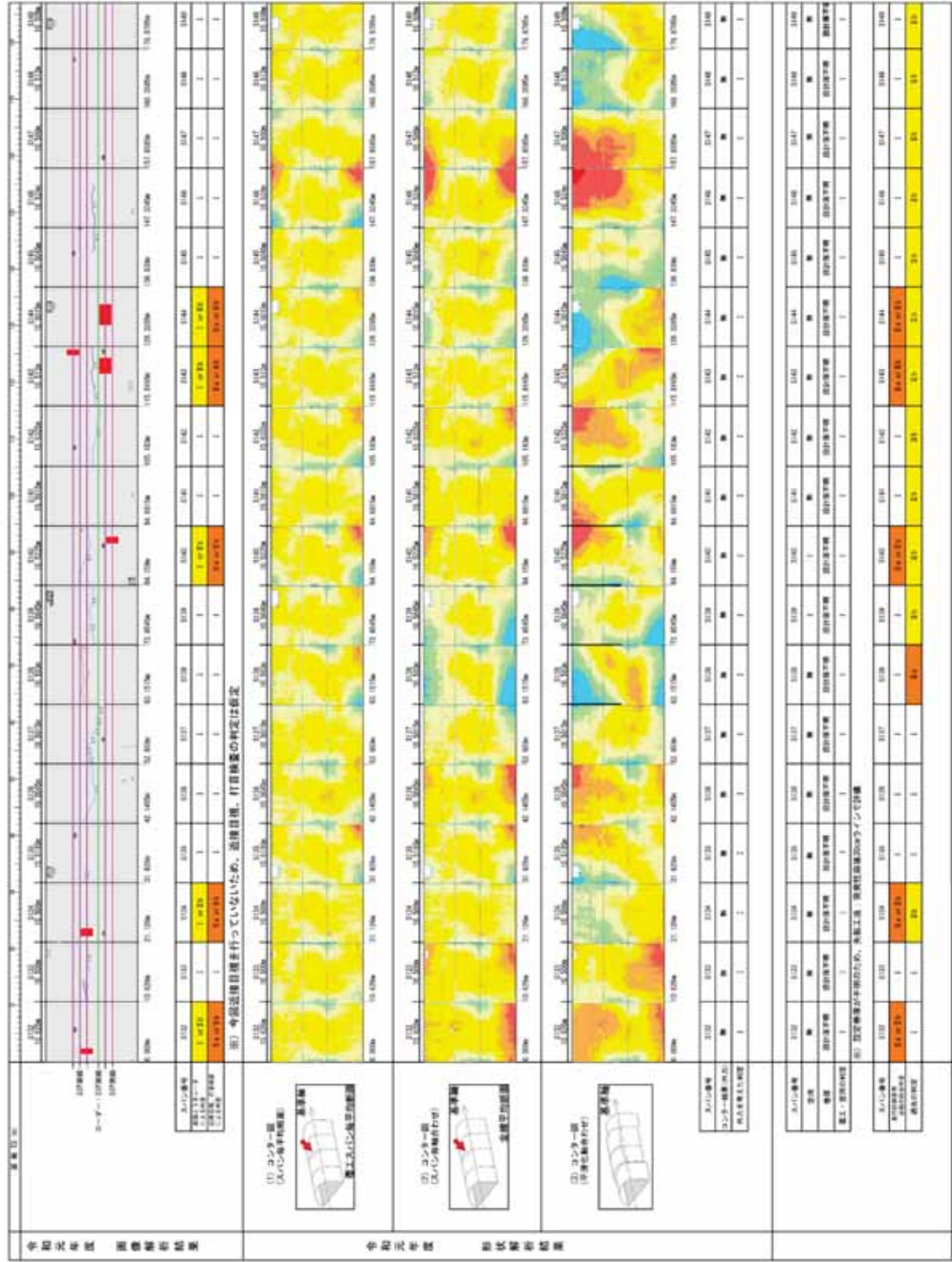


竜黒機トンネル 解析展開図



4) 朝日トンネル

朝日トンネル 解析展開図

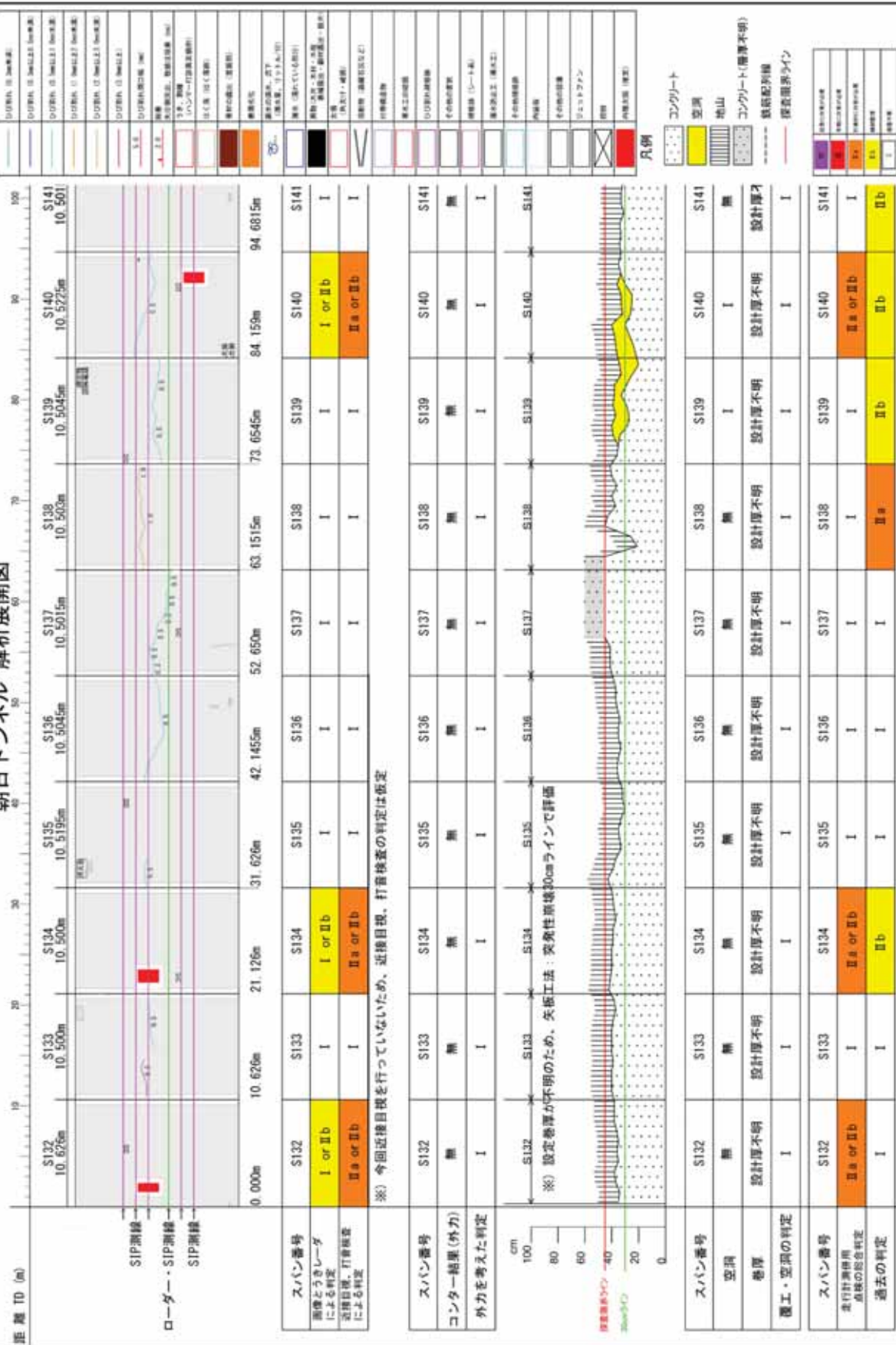


	1) 1次掘削 (掘削直後)
	2) 2次掘削 (掘削直後)
	3) 3次掘削 (掘削直後)
	4) 4次掘削 (掘削直後)
	5) 5次掘削 (掘削直後)
	6) 6次掘削 (掘削直後)
	7) 7次掘削 (掘削直後)
	8) 8次掘削 (掘削直後)
	9) 9次掘削 (掘削直後)
	10) 10次掘削 (掘削直後)
	11) 11次掘削 (掘削直後)
	12) 12次掘削 (掘削直後)
	13) 13次掘削 (掘削直後)
	14) 14次掘削 (掘削直後)
	15) 15次掘削 (掘削直後)
	16) 16次掘削 (掘削直後)
	17) 17次掘削 (掘削直後)
	18) 18次掘削 (掘削直後)
	19) 19次掘削 (掘削直後)
	20) 20次掘削 (掘削直後)
	21) 21次掘削 (掘削直後)
	22) 22次掘削 (掘削直後)
	23) 23次掘削 (掘削直後)
	24) 24次掘削 (掘削直後)
	25) 25次掘削 (掘削直後)
	26) 26次掘削 (掘削直後)
	27) 27次掘削 (掘削直後)
	28) 28次掘削 (掘削直後)
	29) 29次掘削 (掘削直後)
	30) 30次掘削 (掘削直後)
	31) 31次掘削 (掘削直後)
	32) 32次掘削 (掘削直後)
	33) 33次掘削 (掘削直後)
	34) 34次掘削 (掘削直後)
	35) 35次掘削 (掘削直後)
	36) 36次掘削 (掘削直後)
	37) 37次掘削 (掘削直後)
	38) 38次掘削 (掘削直後)
	39) 39次掘削 (掘削直後)
	40) 40次掘削 (掘削直後)
	41) 41次掘削 (掘削直後)
	42) 42次掘削 (掘削直後)
	43) 43次掘削 (掘削直後)
	44) 44次掘削 (掘削直後)
	45) 45次掘削 (掘削直後)
	46) 46次掘削 (掘削直後)
	47) 47次掘削 (掘削直後)
	48) 48次掘削 (掘削直後)
	49) 49次掘削 (掘削直後)
	50) 50次掘削 (掘削直後)
	51) 51次掘削 (掘削直後)
	52) 52次掘削 (掘削直後)
	53) 53次掘削 (掘削直後)
	54) 54次掘削 (掘削直後)
	55) 55次掘削 (掘削直後)
	56) 56次掘削 (掘削直後)
	57) 57次掘削 (掘削直後)
	58) 58次掘削 (掘削直後)
	59) 59次掘削 (掘削直後)
	60) 60次掘削 (掘削直後)
	61) 61次掘削 (掘削直後)
	62) 62次掘削 (掘削直後)
	63) 63次掘削 (掘削直後)
	64) 64次掘削 (掘削直後)
	65) 65次掘削 (掘削直後)
	66) 66次掘削 (掘削直後)
	67) 67次掘削 (掘削直後)
	68) 68次掘削 (掘削直後)
	69) 69次掘削 (掘削直後)
	70) 70次掘削 (掘削直後)
	71) 71次掘削 (掘削直後)
	72) 72次掘削 (掘削直後)
	73) 73次掘削 (掘削直後)
	74) 74次掘削 (掘削直後)
	75) 75次掘削 (掘削直後)
	76) 76次掘削 (掘削直後)
	77) 77次掘削 (掘削直後)
	78) 78次掘削 (掘削直後)
	79) 79次掘削 (掘削直後)
	80) 80次掘削 (掘削直後)
	81) 81次掘削 (掘削直後)
	82) 82次掘削 (掘削直後)
	83) 83次掘削 (掘削直後)
	84) 84次掘削 (掘削直後)
	85) 85次掘削 (掘削直後)
	86) 86次掘削 (掘削直後)
	87) 87次掘削 (掘削直後)
	88) 88次掘削 (掘削直後)
	89) 89次掘削 (掘削直後)
	90) 90次掘削 (掘削直後)
	91) 91次掘削 (掘削直後)
	92) 92次掘削 (掘削直後)
	93) 93次掘削 (掘削直後)
	94) 94次掘削 (掘削直後)
	95) 95次掘削 (掘削直後)
	96) 96次掘削 (掘削直後)
	97) 97次掘削 (掘削直後)
	98) 98次掘削 (掘削直後)
	99) 99次掘削 (掘削直後)
	100) 100次掘削 (掘削直後)



	指定断面が平均的なため、各断面は、指定断面と同様に評価
	指定断面が平均的でないため、各断面は、指定断面と同様に評価
	指定断面が平均的でないため、各断面は、指定断面と同様に評価
	指定断面が平均的でないため、各断面は、指定断面と同様に評価
	指定断面が平均的でないため、各断面は、指定断面と同様に評価

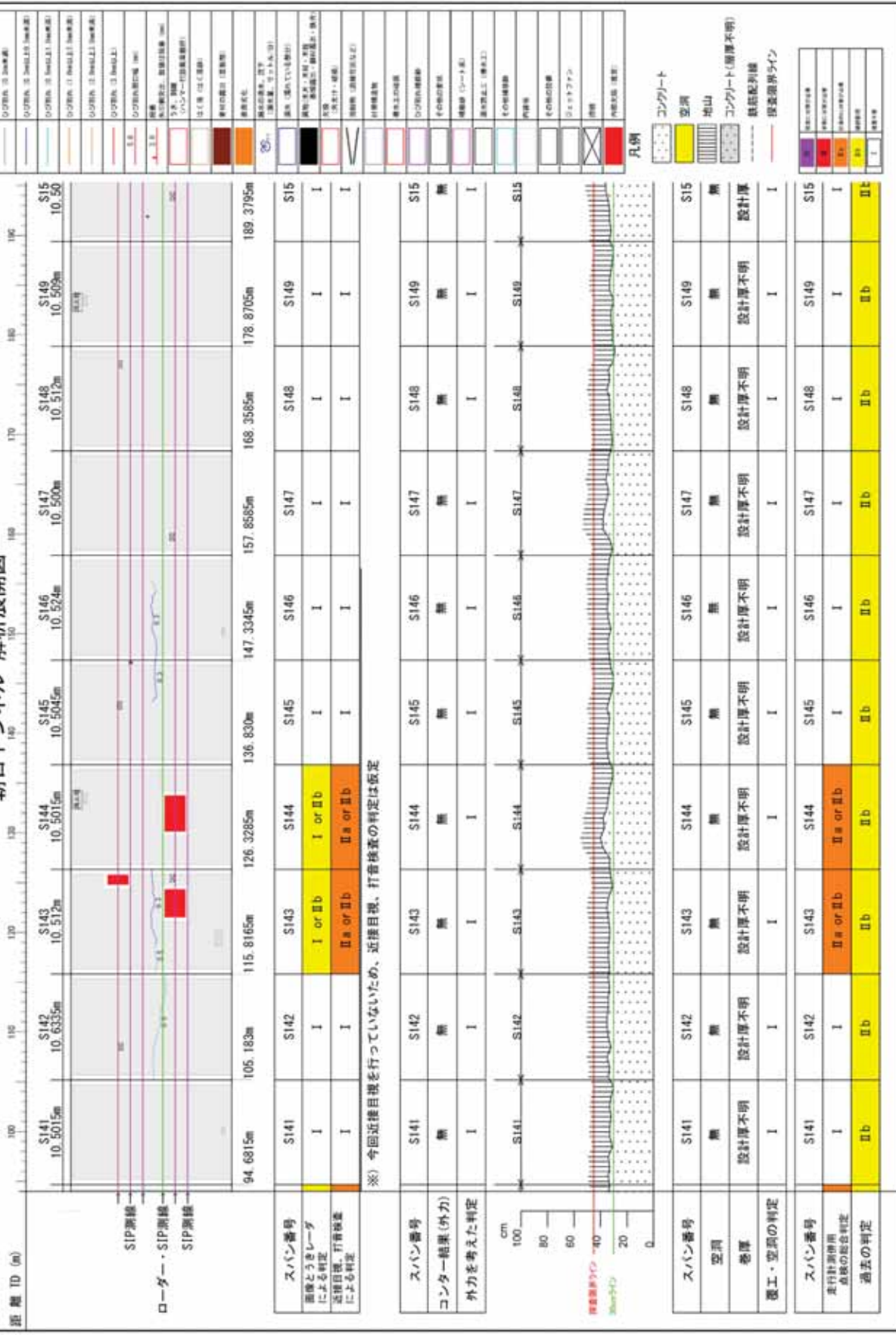
朝日トンネル 解析展開図



※) 今回近接目視を行っていないため、近接目視、打音検査の判定は仮定

※) 設計厚が不明のため、矢張り法：突異性断縁30cmラインで評価

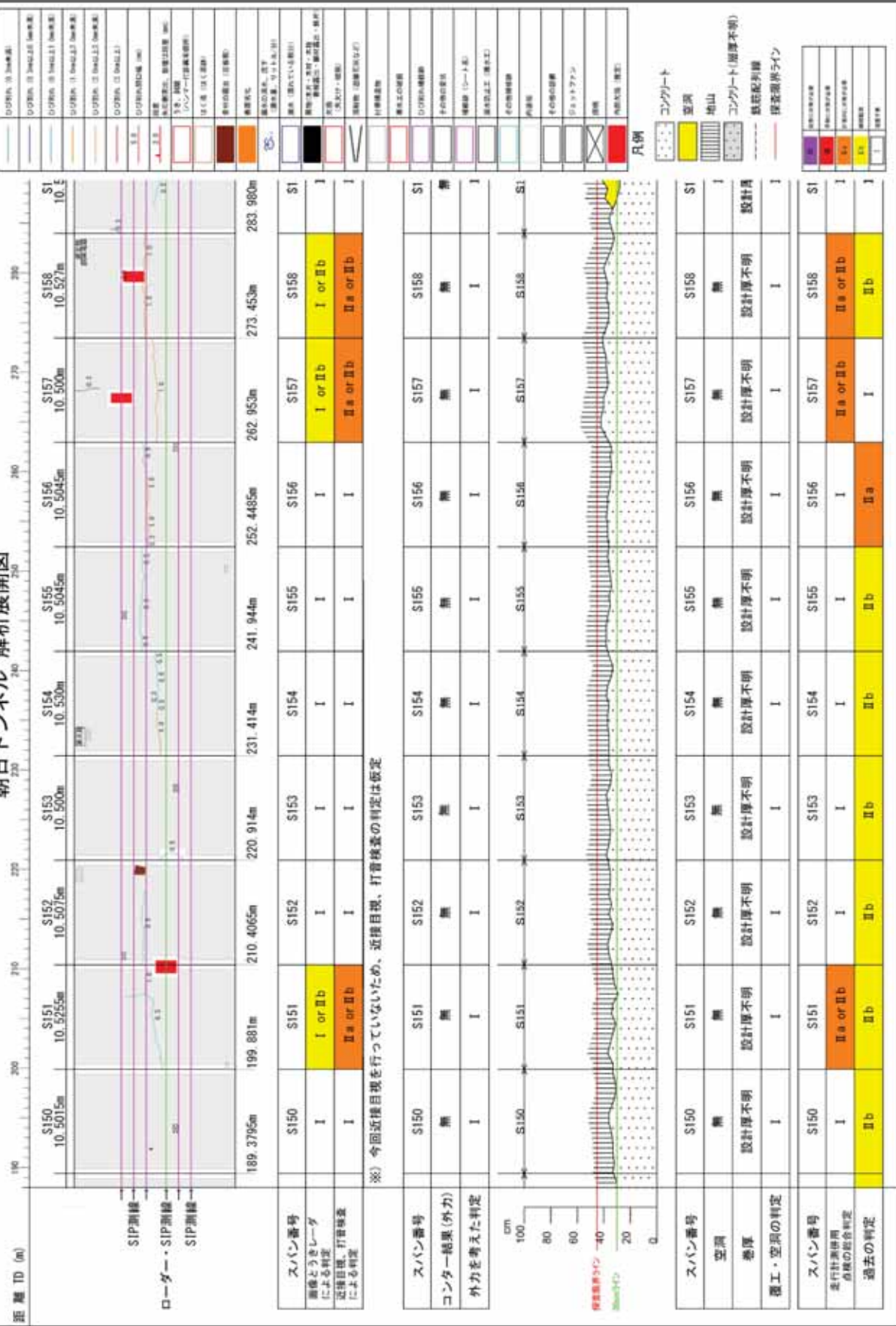
朝日トンネル 解析展開図



※) 今回近接目視を行っていないため、近接目視、打音検査の判定は仮定

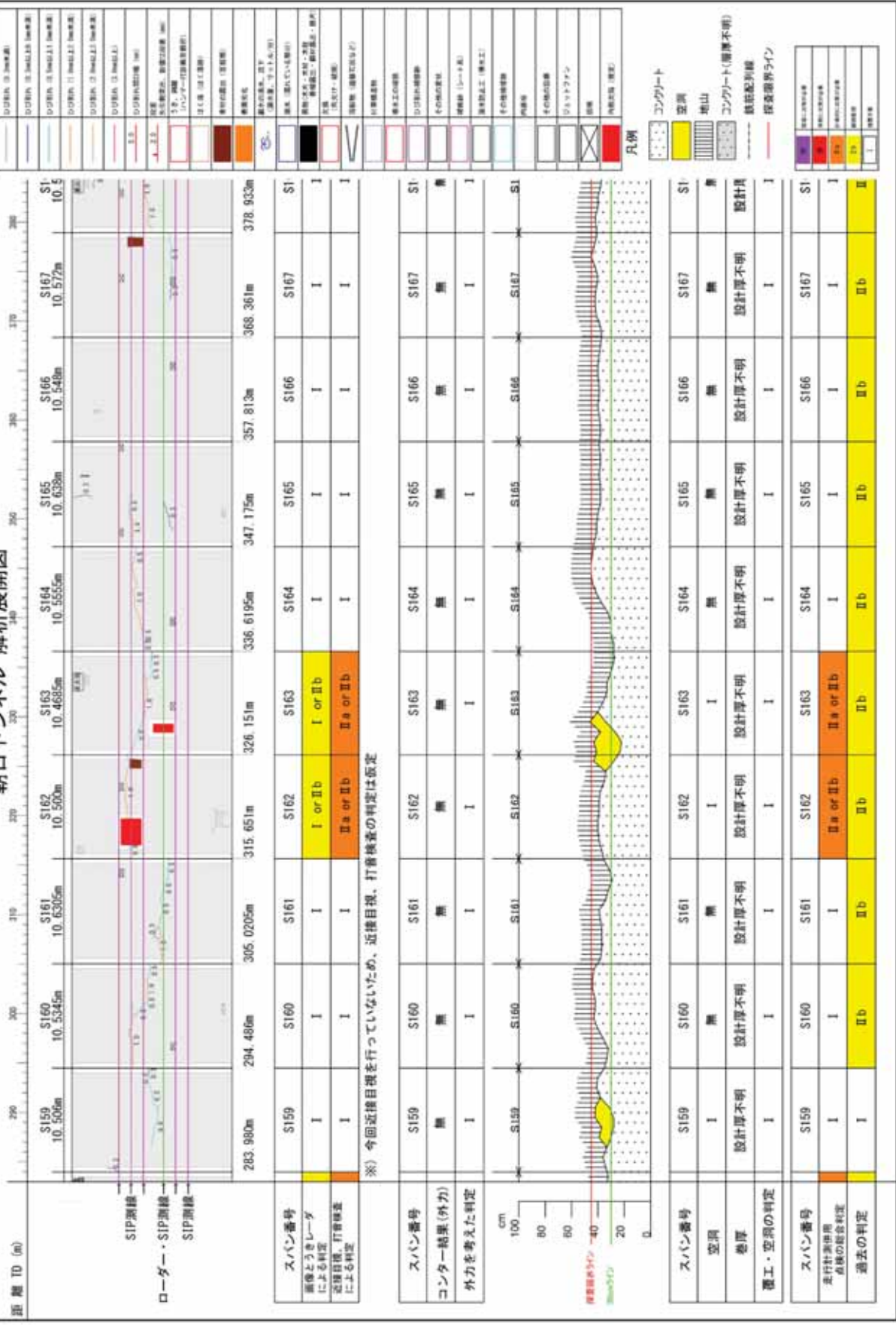
スパン番号	長さ (m)	設計	調査	判定
S141	10.5015m	設計厚不明	設計厚不明	I
S142	10.6335m	設計厚不明	設計厚不明	I
S143	10.512m	設計厚不明	設計厚不明	I
S144	10.5015m	設計厚不明	設計厚不明	II a or II b
S145	10.5045m	設計厚不明	設計厚不明	I
S146	10.524m	設計厚不明	設計厚不明	I
S147	10.500m	設計厚不明	設計厚不明	I
S148	10.512m	設計厚不明	設計厚不明	I
S149	10.509m	設計厚不明	設計厚不明	I

朝日トンネル 解析展開図



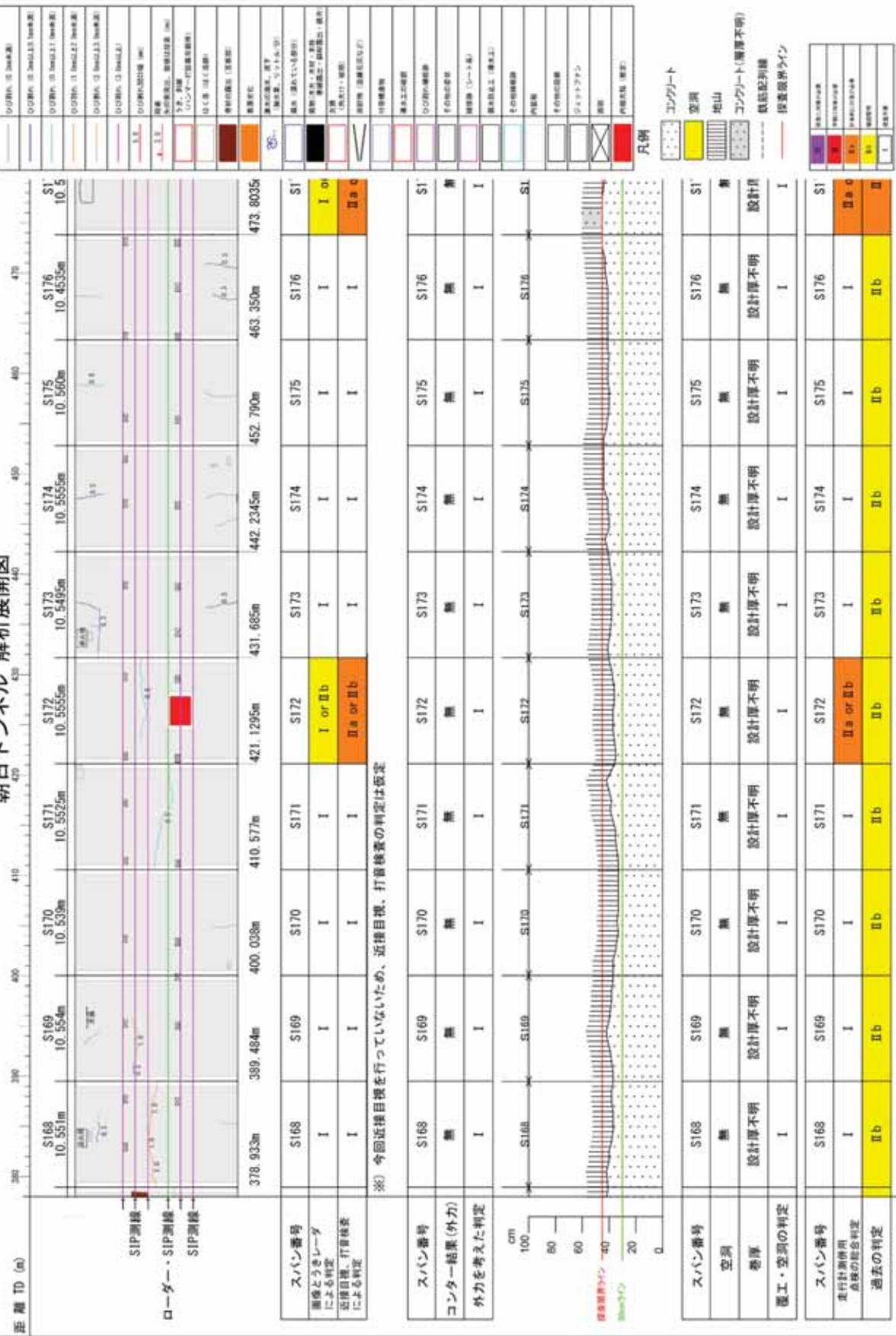
※) 今回近接目視を行っていないため、近接目視、打音検査の判定は仮定

朝日トンネル 解析展開図



※) 今回近接目標を行っていないため、近接目標、打音検査の判定は仮定

朝日トンネル 解析展開図



(8) 3次元可視化およびデータベース

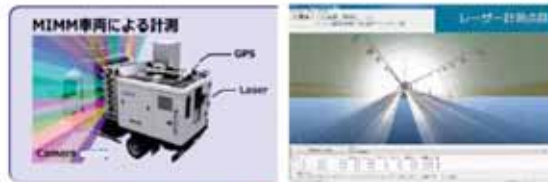
1) 3次元可視化

走行型計測手法は、画像計測のほかにレーザ計測による形状計測が可能であり、点群に基づく3次元モデルを構築し、正確な位置同期による画像合成、および変状位置取得が実現できる。この特性を活用し、変状情報を含む3次元モデルを構築した。

1. 3次元可視化システム

健全性を総合的に評価できる
統合型診断システム

- ①画像自動合成
- ②自地位置検出
- ③変形コンター表示
- ④レーダ波形表示



2. トンネルデータベース

- ①ひび割れ自動抽出等
- ②点検展開図等
- ③データベースシステム
- ④Viewerシステム
- ⑤iPad連携

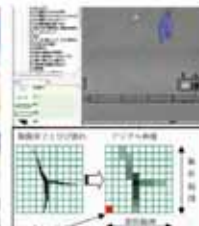


図 3-57 システム概要

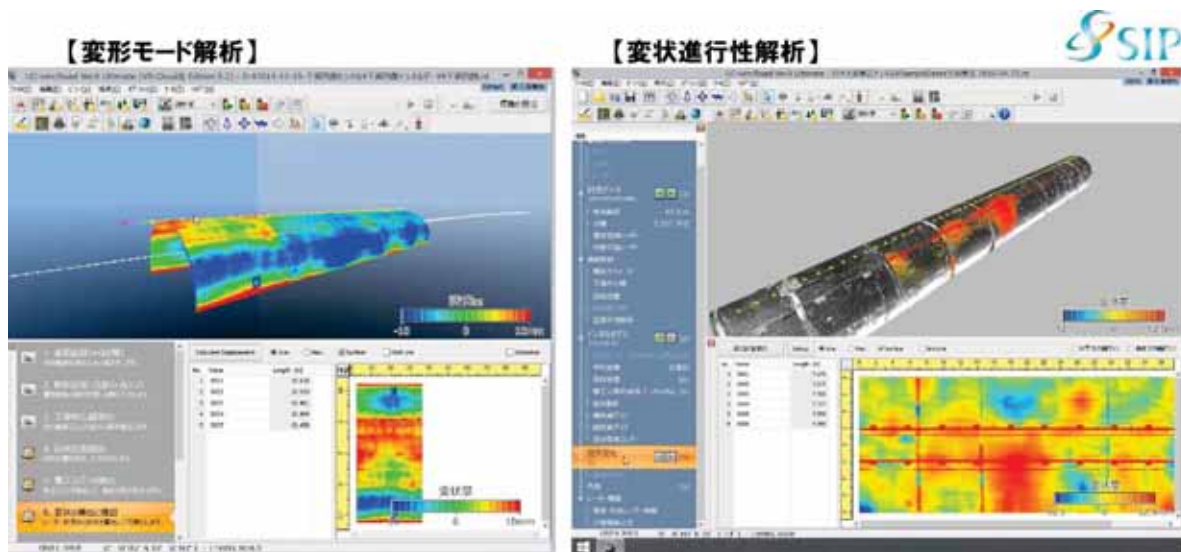
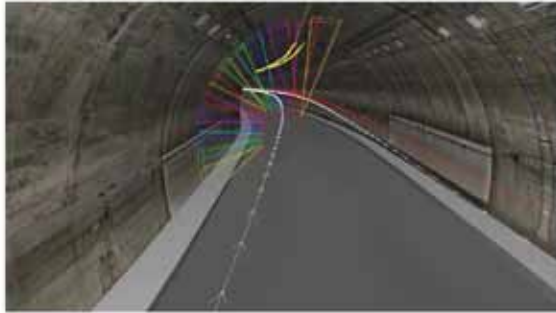


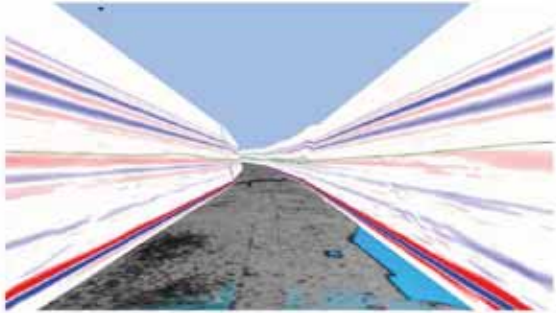
図 3-58 変形モード解析，変状進行性解析の3次元表示



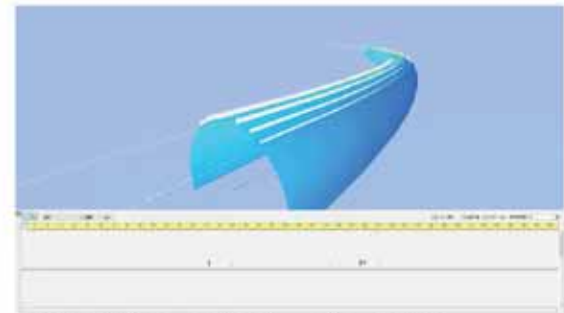
トンネル覆工画像計測



レーザの点群表示



巻厚不足、背面空洞表示



内部欠陥表示 (浮き、ジャンカ)

図 3-59 画像, 点群, レーダの 3 次元表示

レーザ点群の座標情報による 3 次元モデリングに、画像や展開図情報を重畳することにより 3 次元可視化モデルを構築した。

3D Modeling Image composition using laser system

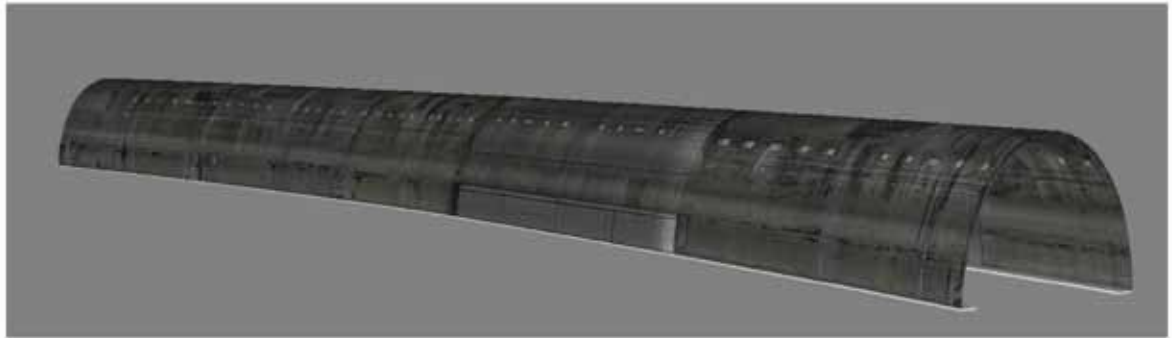


図 3-60 3次元可視化モデル (山方トンネル)

2) データベースシステム

走行型計測によって取得できる画像、レーザ、レーダデータを点群の位置情報で同期させたデータベースシステムを構築した。ひび割れは自動抽出ソフトで作成し、変状や問題箇所などを編集画面で編集したのち、所定の書式に一括出力できる。

また現地点検作業のうち、スケッチに要する時間を短縮するため、事前に作成した展開図をタブレット PC に格納して現地に持ち込み、近接目視、打音検査した結果により事前に作成した展開図を修正する方法を開発した(オンサイトシステム)。これらを総合し、トータルの時間短縮とコスト縮減を実現している。

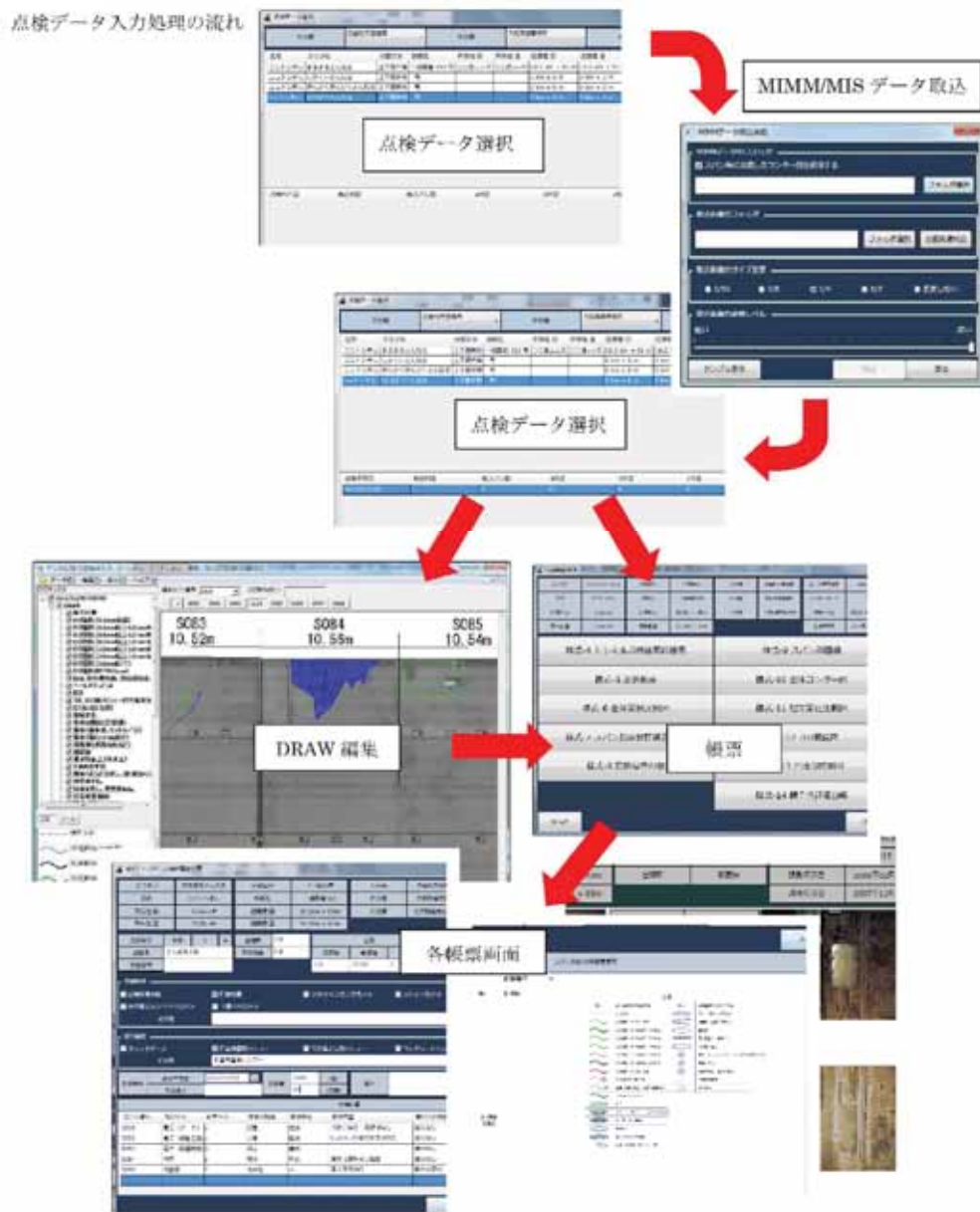
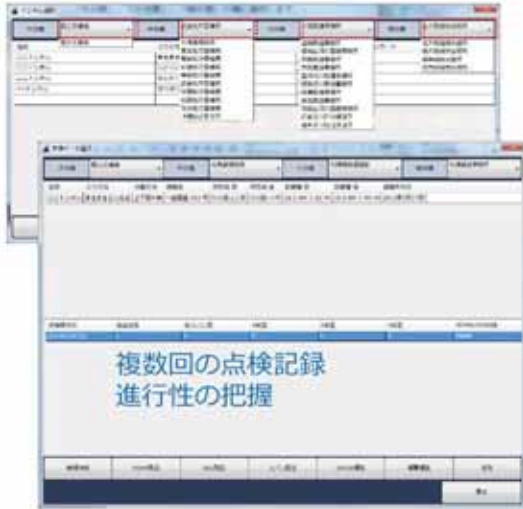
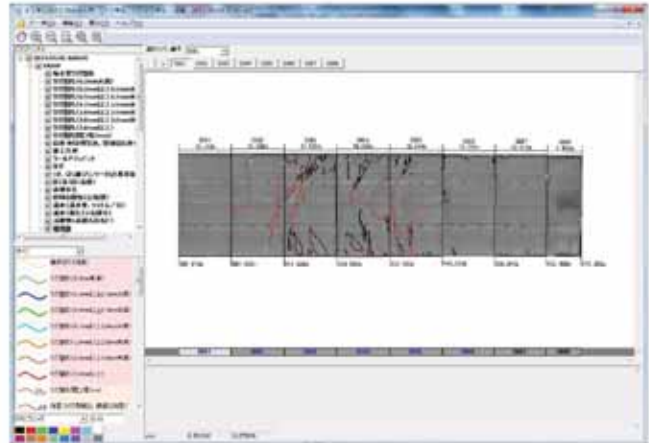


図 3-61 トンネルデータベースシステムの流れ

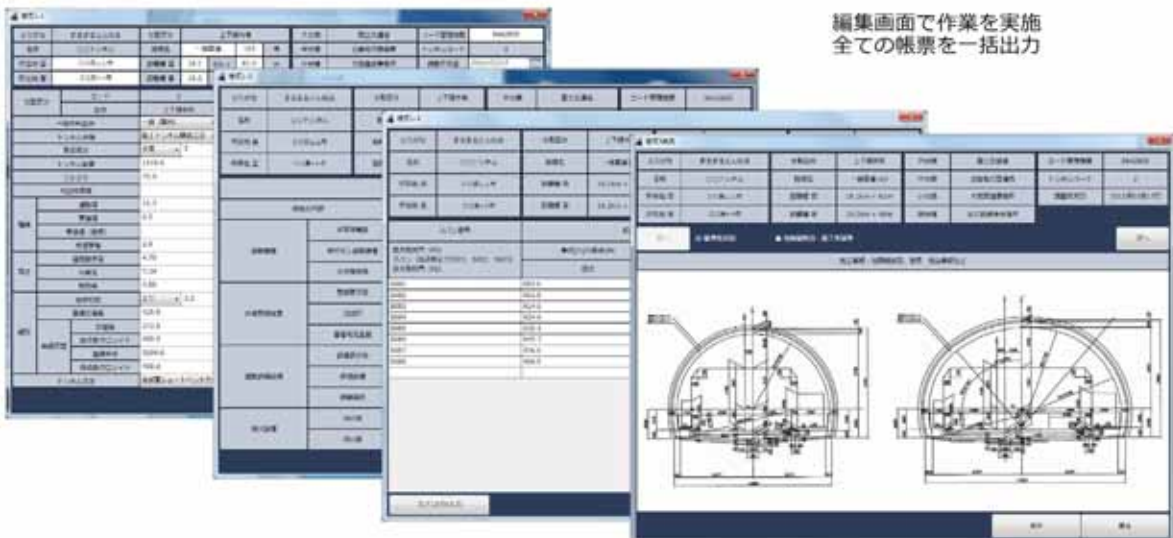
トンネル選択



編集画面



帳票 様式



編集画面で作業を実施
全ての帳票を一括出力

図 3-62 トンネルデータベースシステムの自動帳票出力イメージ

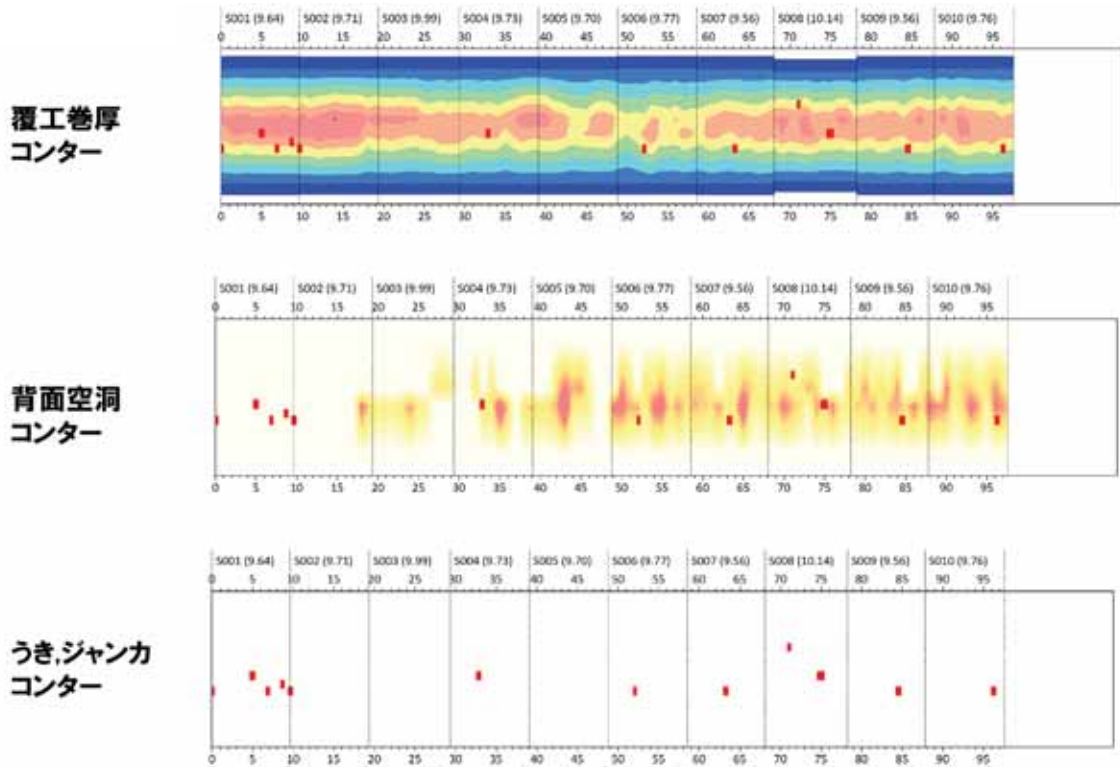


図 3-63 レーダ解析結果の2次元出力事例



図 3-64 トンネル点検入力ツール オンサイトシステム

3) 統合型診断システム

本システムは、下記の機能を有する。

- ①点群解析機能： トンネル点群から自動的に目地位置検出を行い、スパンごとに断面形状やスパン軸を高精度に抽出し、変状モード解析のコンター表示および2時期の進行性差分表示を行う機能（3D表示）
- ②覆工壁面の変状図作成機能： 計測した覆工表面画像を点群の位置情報に基づき合成し、ひびわれ、漏水などの変状展開図を作成する機能（3D表示）
- ③レーザ計測結果可視化機能： 内部欠陥、巻厚・空洞厚の計測・解析結果を点群情報により位置同期し、3D表示、コンター、縦・横断面図表示する機能
- ④3D可視化診断機能： 画像、レーザ、レーダの各解析結果を3D可視化表示し、重ね合わせて表示することにより、変状原因推定や健全度診断を支援する機能
- ⑤データベース機能： 所管する多数のトンネル、複数回の点検記録をデータベース化し、変状および対策履歴を保管する機能

システム解析は3次元処理を行い、必要に応じて2次元展開出力を行っている。曲線をもつトンネルに関しては、そのまま2次元展開すると、曲線部に空白が生じてしまうため、曲線にも対応できるように機能開発を行った。差分解析による進行性箇所検出に関する機能開発については、異なる年度に計測された情報により算出される個別の変状結果について、相対的な位置関係での変状差分にて経年変化を算出する機能開発を行った。CIM対応に関する機能開発については、本システムで計測データを解析し、3次元・2次元で可視化した情報を他のデータへエクスポートし、そのエクスポートしたデータを他システムと連携させることで、CIMシステムの構築に役立てることができるような機能開発を行った。

以上の統合型診断システムの全体像を、図 3-65 に示す。

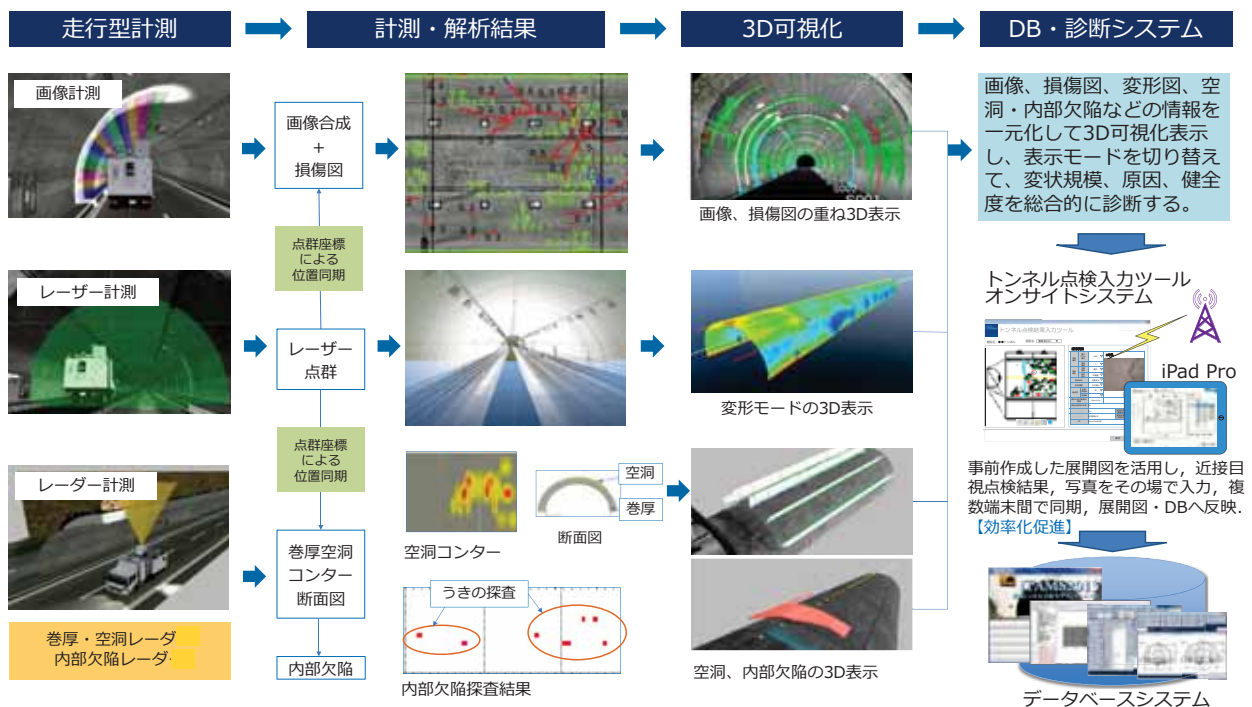


図 3-65 統合型走行計測システムによる点検のフロー

4) 統合型診断システムの検証結果

走行型計測の有効性を検証するため、実際のトンネルに対してフィールド試験を実施した。本試験では、トンネルの変状の有無やその位置・範囲などを記録するとともに、断面形状計測、空洞探査、うき探査を実施した。

「道路トンネル定期点検要領」⁴⁾に示される点検結果の判定の目安に基づき、新技術により支援できる内容を評価した。

走行型計測技術は、近接目視点検、打音検査の完全代替にはならないため、別途定期点検として近接目視点検、打音検査を行い確認する必要があるが、走行型計測結果を活用することにより近接目視・打音検査前に要注意箇所抽出を行うこと、点検の効率化、客観的・正確な変状展開図作成支援、および概略判定を行うことは十分可能であることを確認した。

表 3-12 に、道路トンネル定期点検要領⁴⁾に示される判定の目安と、その判定に活用できる走行型計測技術の支援内容と有効性をとりまとめた。

- ① 近接目視前にカメラ、レーザ、レーダ（巻厚・空洞）により近接目視で留意するべき変状を抽出し、特にその箇所を重点的に点検することによって、従来点検を効果的に支援できる。近接目視時に人力にて行う展開図スケッチについて、走行計測を活用することで効率化を図ることができる。
- ② 打音検査の前に内部欠陥レーダにより「うき」が懸念される箇所および健全箇所をスクリーニングしておくことで、打音検査の合理化、効率化を図ることができる。
- ③ 一般的に、近接目視点検時にはレーダ探査などの調査は実施せず、空洞情報を含む診断は困難であるが、事前にレーダ探査することで、客観的な健全度診断を行うことができる。

表 3-12 走行型計測の支援内容と有効性

「道路トンネル定期点検要領」に示される判定の目安				走行型計測の適用性				
① 圧ざ・ひび割れ（外力）								
表-解 8.5 点検時（ひび割れの進行の有無が確認できない場合）の判定の目安例								
対象区分	部位区分	ひび割れ				判定区分		
		幅		長さ				
		5mm以上	3~5mm	3mm未満	10m以上	5~10m	5m未満	
覆工	断面内			○	○	○	○	I~IIa
			○					IIa
			○			○		III
			○				○	IIIb~III
			○			○		III
			○				○	IV
② うき、はく離（材質劣化）								
表-解 8.9 うき・はく離等に対する判定の目安例								
対象箇所	部位区分	ひび割れ等の状況			打音異常			
					有	無		
覆工	断面内	ひび割れ等はあるものの、進行しても割合の悪化がない			IIIb			
		ひび割れ等は割合としてはないものの、ひび割れの進行により割合が悪化される			III	IIIb		
		ひび割れ等が割合しブロック化している			IV	IIIb~III		
		漏水防止モルタルや補修材が材質劣化している			III~IV	IIIb~III		
		覆工コンクリートや骨材が離析化している、あるいは圧縮等があり材質劣化している			IV	IIIb~III		
③ 変形、移動、沈下								
対象箇所	部位区分	変形速度				判定区分		
		10mm/年以上	3~10mm/年	1~3mm/年	1mm/年未満			
		著しい	進行がみられる	進行がみられる~緩慢	緩慢			
覆工 路面 路肩	断面内			○	○	IIIb~IIa		
						IIa		
			○	○		III		
			○			IV		
④ 有効巻厚の不足・減少								
(矢板工法の場合)								
箇所	主な原因	有効巻厚/設計巻厚			判定区分			
		1/2未満	1/2~2/3	2/3以上				
アーチ・側壁	経年劣化凍害 アルカリ骨材反応 施工の不適切等			○	IIIb			
			○		IIa~III			
		○			III~IV			
【参考】突発性の崩壊の可能性に対する判定の目安例 (矢板工法の場合)								
覆工巻厚	背面空洞深さ	大 (30cm以上程度)	小 (30cm未満程度)					
	小 (30cm未満程度)	III, IV						
	大 (30cm以上程度)	IIa, III						
有効巻厚の不足・減少については定期点検（近接目視、打音検査）だけでは把握できなく、次の調査が必要となる。 地中レーダ探査、削孔調査、圧縮強度試験								
【ひび割れ】								
変状の判定項目	対応技術	適用の判定						
ひび割れ幅、長さ	画像計測	○						
画像解析により、ひび割れ幅(0.3mm以上)、長さを判定可能								
【うき、はく離】								
変状の判定項目	対応技術	適用の判定						
ひび割れ形状	画像計測	△~○ ^{※1}						
表面の状態	画像計測	△~○ ^{※1}						
表面の凹凸	レーザ計測	△ ^{※2}						
うき検知	レーダ計測	△~○ ^{※3}						
打音(濁音)	—	×						
※1：ひび割れの形状や変色状況からうき、はく離が疑われる箇所として検出できる。								
※2：上記の箇所について、段差を伴う場合はさらにうき・はく離である可能性が高い。								
※3：内部欠陥レーダにより、うきが懸念される箇所をスクリーニングできる（幾分多めに抽出）								
【変形】								
変状の判定項目	対応技術	適用の判定						
変形速度	レーザ計測	○						
1回の計測で変形速度自体は検出できないが、推定は可能、変形の有無や変形モードは判定可能。								
【有効巻厚】								
変状の判定項目	対応技術	適用の判定						
覆工巻厚	非接触 レーダ計測	○ ^{※1}						
圧縮強度	—	×						
【突発性崩壊】								
変状の判定項目	対応技術	適用の判定						
背面空洞深さ	非接触 レーダ計測	○ ^{※1}						
※1：探査深度50cm程度までは巻厚不足や空洞あるいは空隙が疑われる箇所を抽出することができる。50cm以深の探査が必要な場合は、別途接触レーダを実施する必要があるが、有効厚としては十分であり問題となることは少ない。								
非接触レーダ計測で巻厚不足や空洞等が疑われる箇所については、左記の調査を実施し確認する。								

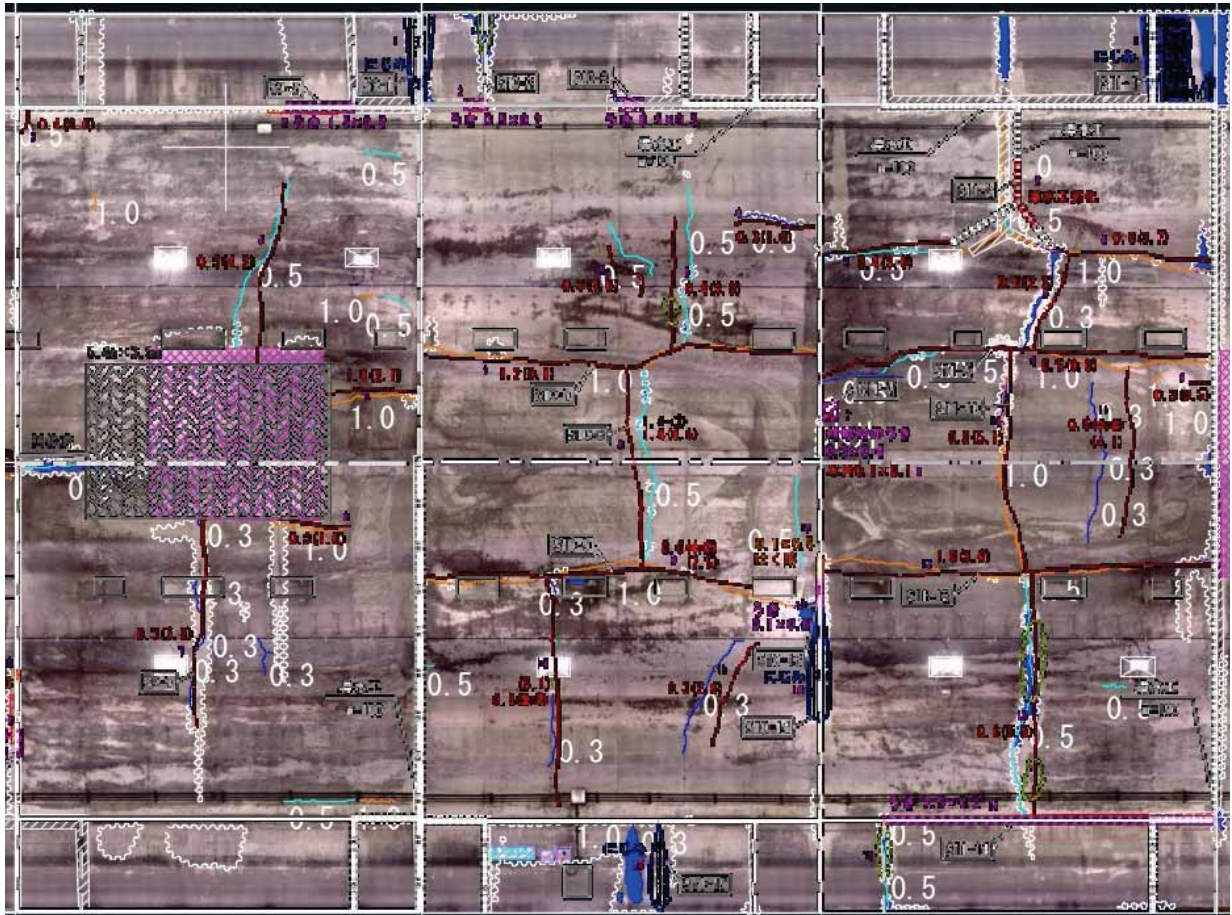


図 3-66 山方トンネル 点検手法による展開図の差異

今回、山方トンネルにおいて、変状位置の客観的正確性について、既往の展開図を重ねて表示し検証した。その結果を図 3-66 に示す。従来点検の展開図は目視によりスケッチを作成するため、どうしても正確な位置で作成することは困難であり、新たな変状、変状の進行性、見落とし防止などのためには、正確な展開図が必要となる。

図 3-66 は、走行型計測手法によって取得した画像をベースに作成した展開図の上に、既往の定期点検で作成した人力による展開図を重ねて表示したものである。既往の展開図は PDF であったため、エンジ色のひび割れなどの変状が粗い表示となっている。

5) コスト検討

走行型計測技術(MIMM-R)の活用についてのコスト試算結果を以下に示す。

(画像計測技術、変状自動抽出および写真台帳自動整理技術を活用した場合)

【試算条件】

- ① トンネル延長 500m (覆工周長 17m)
- ② トンネル本数 1 本の場合と 10 本の場合をそれぞれ比較
 - ※ 走行型計測車両の機械損料の関係から、複数トンネルを同時(同日)に計測することでコストメリットを出すことができるため。
- ③ 覆工壁面のひび割れ密度 c は、 $0.1 < c \leq 0.2 \text{ m/m}^2$ とする。

【走行型計測活用による効率化】

- ① 事前に画像展開図による変状抽出および変状確認を行うため、近接目視点検時には変状の目視確認と打音検査だけに集中できる(スケッチ作業等不要)ことから、現地点検作業を 50%効率化することができるものとした (SIP による技術開発現場検証実績より)。
- ② 上記により近接目視歩掛の低減化および点検時の交通規制時間の短縮ができるものとした。

図 3-67 に示すとおり、条件によって結果は異なるが、ほぼ同等から 3 割程度縮減できることがわかった。

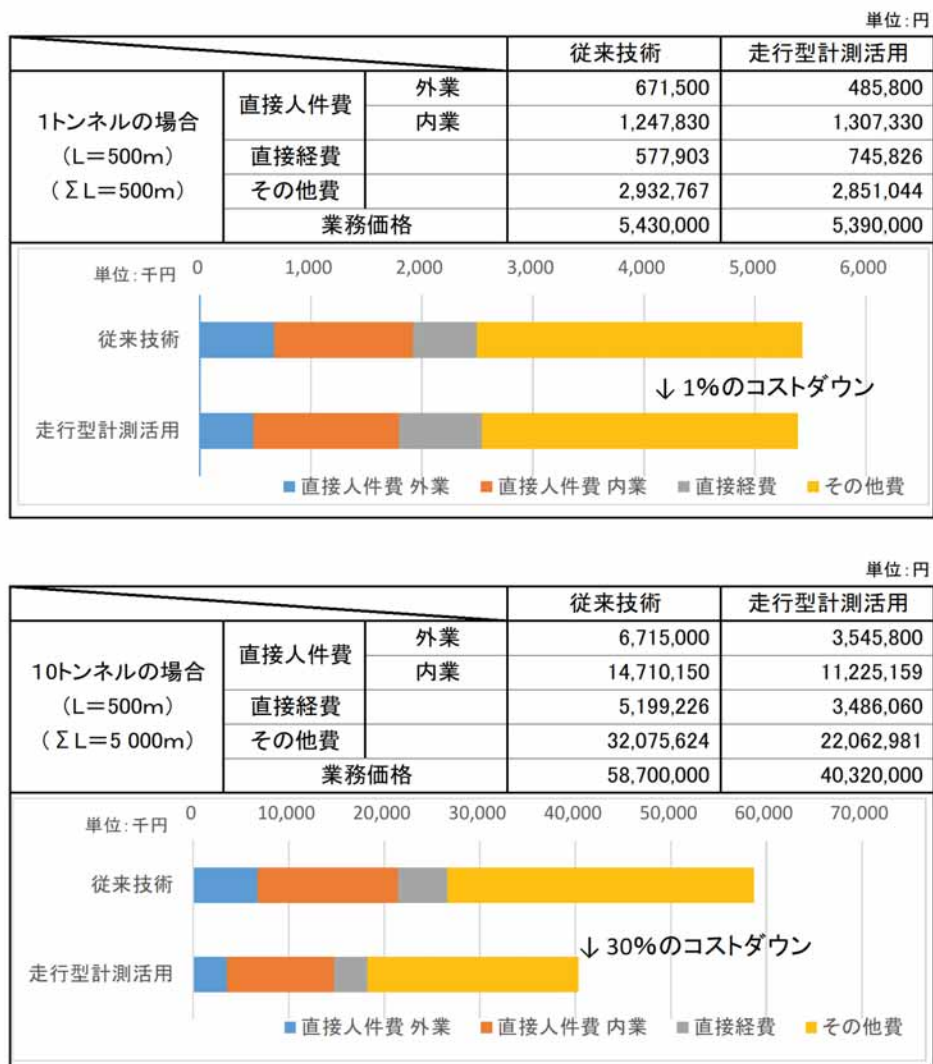


図 3-67 コスト試算結果

6) まとめ

以上のように従来点検の各フェーズに対して、人力とロボットによる点検を効果的に融合すること（ベストミックス）が活用の基本方針である。カメラ、レーザ、レーダを搭載した統合型走行計測システムにより、近接目視、打音検査の前に計測を実施し、近接目視、打音検査の併用技術として支援することによって、点検フロー全般の効率化、合理化、高度化、低コスト化を図るとともに、取得した 3D 可視化情報を総合的に活用し健全性診断を支援する技術としての活用場面を想定している。

期待する効果としては、①従来点検前に計測することにより近接目視点検での要注意箇所の抽出、事前変状展開図作成による効率化・高度化の実現、②内部欠陥レーダによる要注意箇所の抽出、レーダ活用による効率化、高度化、③カメラ、レーザ、レーダを近接目視、打音検査に併用支援することによる総合的診断の合理化、高度化、④点検帳票作成支援による客観的、正確な展開図作成、DB 作成の効率化、省力化、低コスト化、⑤走行型による計測時間の非交通規制化、事前計測の有効活用による近接目視時の交通規制時間短縮などが挙げられる。

3.5 走行型トンネル点検システム 手法2

3.5.1 概要

三菱インフラモニタリングシステム MMSD II は、8K ラインカメラ、高密度レーザを搭載し、交通規制を行わずに走行しながらトンネル覆工面や路面を計測する技術である。

計測した結果は、高解像画像データ・3次元点群データとして出力する。これらのデータを三菱電機が独自に開発したソフトウェアにより解析し、ひび割れ、遊離石灰、漏水等の変状を抽出する。抽出した変状は変状展開図や変状写真台帳として出力可能。



図 3-68 MMSD の概要

MMSD シリーズとしては、トンネル点検に適した MMSD II のほか、高密度レーザと全方位カメラを搭載し鉄道沿線設備計測や法面変状計測に適した MMSD I や、MMSD II と同等機能を持ちつつ、計測機構を車両から分離して低床台車に搭載することで鉄道の小径トンネル計測を実現可能とした MMSD III があり、用途に応じた使い分けが可能である。

本稿では、トンネル点検の支援技術として、MMSD II (MMSD III も同等) の機能・技術を記載するものとし、以下「MMSD」と略す。



図 3-69 MMSD 計測車両

3.5.2 機能

MMSD は、6t 貨物車両をベースとした車両に高密度レーザ、GNSS、IMU、8K ラインカメラ等のセンシング機器を搭載し、トンネル計測を行う。

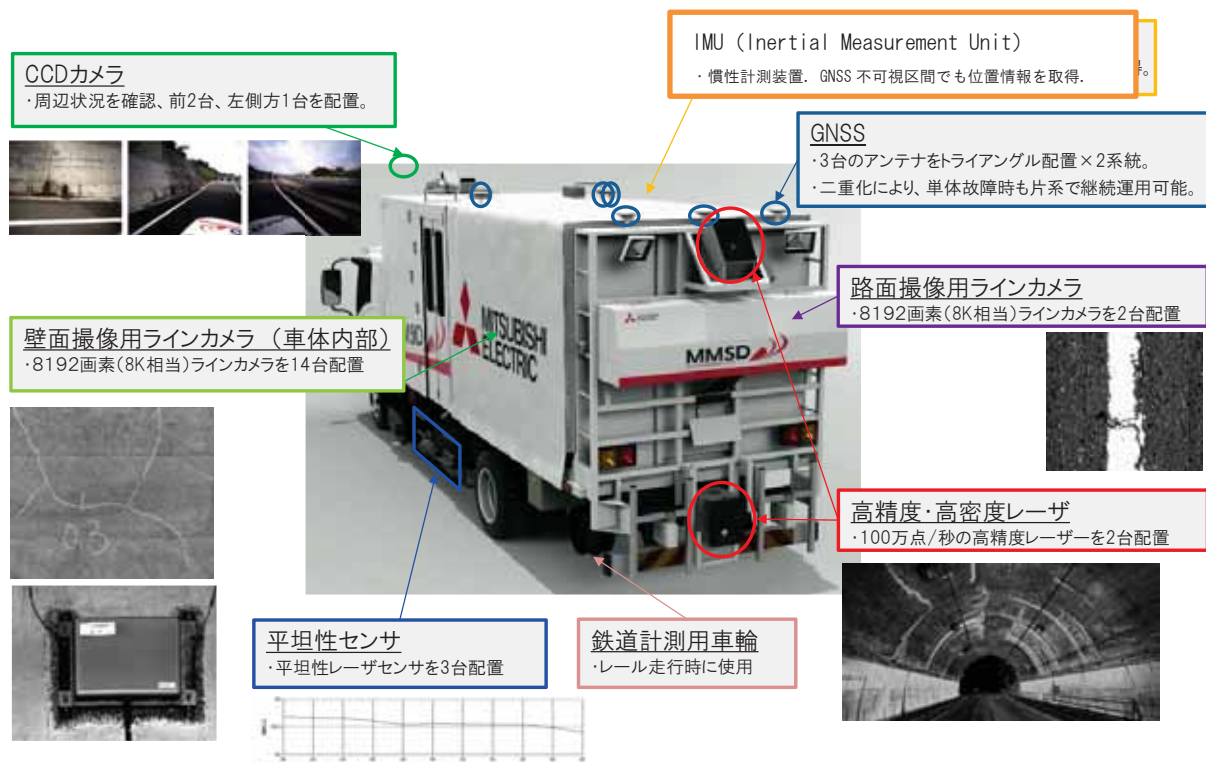


図 3-70 MMSD II のセンサー配置

(1) 3次元レーザ計測

車両後部に実装した高精度・高密度レーザスキャナを用い、周囲の3次元形状を計測する。レーザスキャナは最大100万点/秒程度のレーザ反射データを取得できるものを上下に計2台配置し、計200万点/秒程度の高密度なデータ取得を行う。

取得したレーザ反射データは、GNSSとIMUにより得られた車両の位置姿勢と、電子基準点リアルタイム観測データから計算された補正情報を用いて後処理を行うことで、高精度な3次元点群データが生成される。点群データには位置情報が含まれる他、反射強度情報を保持している。



図 3-71 3次元点群データ

(2) トンネル壁面計測

車両内部に実装した14台の壁面撮像用ラインカメラを用い、トンネル壁面全周の画像を計測する。それぞれのラインカメラは、車両のオドメータと同期し、車両の走行に追従した撮像を行う。1台のカメラに1台の赤外線レーザー照明を用い光量を確保することで、明るく高解像度の画像を取得することが出来る。赤外線レーザー照明は不可視光であり、規制を伴わない走行計測中において、周囲の歩行者や自転車、対向車などに配慮した撮像が可能となる。また、車両周囲への進入検知機能によりレーザー照明の出力を自動的に落とす安全機構を備える。

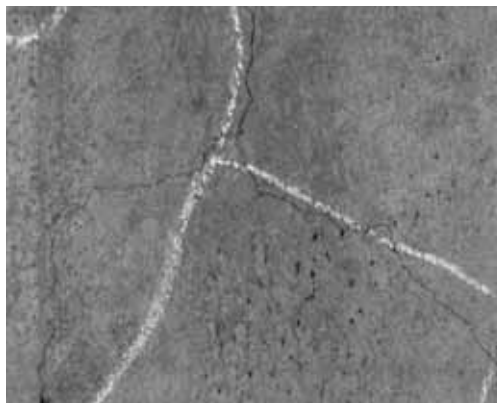


図 3-72 トンネル壁面画像(カメラ1台分)

(3) 路面計測(路面計測画像, 平坦性, わだち掘れ量)

車両後部に実装した 2 台の路面撮像用ラインカメラを用い, 約 4 m 幅の路面の画像を計測する.

壁面撮像と同様に, 車両のオドメータと同期した撮像や, 赤外線レーザ照明を用いた明るく高解像度な画像取得が可能である.

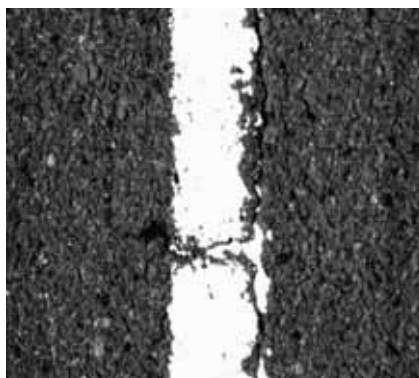


図 3-73 路面撮像画像(カメラ 1 台分)

また, 路面撮像と同期して, 平坦性センサによる路面データ取得も行い, 3次元レーザ計測結果も加えることで, わだち掘れ, 平坦性などの路面性状結果を得ることが出来る.

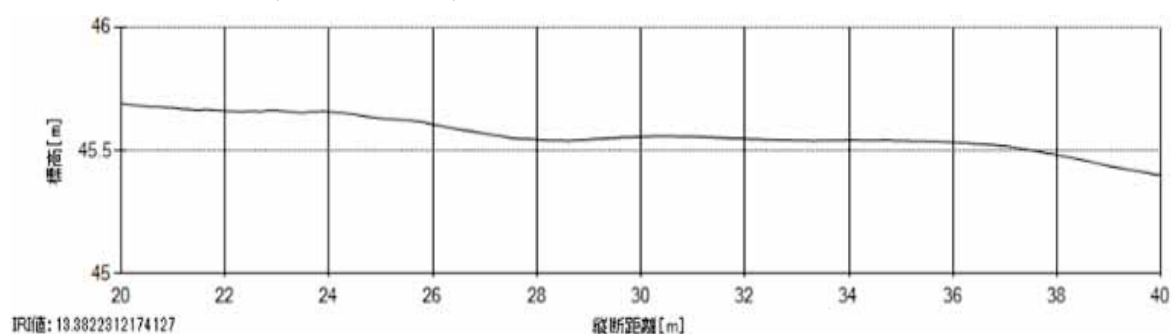


図 3-74 平坦性データ

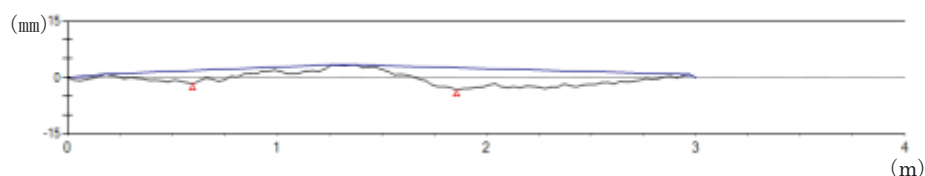


図 3-75 わだち掘れデータ

(4) 周囲画像計測

車両前方, および側方に設置した CCD カメラにより, 周囲の状況を撮像する. またこの画像から得られた色情報を用いて, 3次元点群データへの色付けも可能である.



図 3-76 周囲画像

(5) 画像解析

自社開発ソフトウェアを搭載した自社解析サーバーで、以下の処理を行うことで変状検出する。

- ① 撮影した画像を自社開発ソフトウェアにより 3次元実形状をもとに自動で貼り合わせる。
- ② 変状（ひび割れ，遊離石灰・漏水）を自社開発ソフトウェアにより抽出する。
- ③ 抽出した変状（ひび割れ，遊離石灰・漏水）を DXF に変換し，市販の CAD ソフト上で目視確認し，筋状の汚れ等，ひび割れ以外の抽出結果を手動で削除する。
- ④ 手動編集した DXF を自社開発ソフトウェアに登録し，ひび割れの長さ・幅，遊離石灰・漏水の大きさ（範囲）を自動計測する。
- ⑤ うき，はく離，鋼材腐食については，手動により変状種別を判別する。



図 3-77 壁面画像を貼り合わせた展開画像

(6) 3次元データ解析

1) コンター解析

以下①～③の方式で解析した結果を総合的に判断することで、検出された変状が外力性であるかの判断支援とすることが可能である。

① スパン毎平均断面

各スパンで推定出来形を求め、それをスパン中心軸に沿ってスライドさせてできる推定出来形から、レーザ計測結果を色分けしたものである。

推定出来形断面は各スパンの平均を使用し、軸は各スパンの中心軸を使用する。

⇒ スパン内の局所的な変形を見るのに適する

②スパン毎軸合わせ

トンネル全体で推定出来形を求め、それを各スパン中心軸に沿ってスライドさせた推定出来形から、レーザ計測結果を色分けしたものである。

推定出来形断面はトンネル全体の平均、または指定の断面を使用し、軸は各スパンの中心軸を使用する。

⇒ 各スパンでの差を見るのに適する

③平滑化軸合わせ

トンネル全体で求めた推定出来形を平滑化軸（トンネル全体中心軸）に沿ってスライドさせた推定出来形から、レーザ計測結果を色分けしたものである。

推定出来形断面はトンネル全体の平均、または指定の断面を使用し、軸は平滑化軸を使用する。

上記の解析方式のそれぞれに対して、スパンごとの展開図、点群への色付けが可能である。

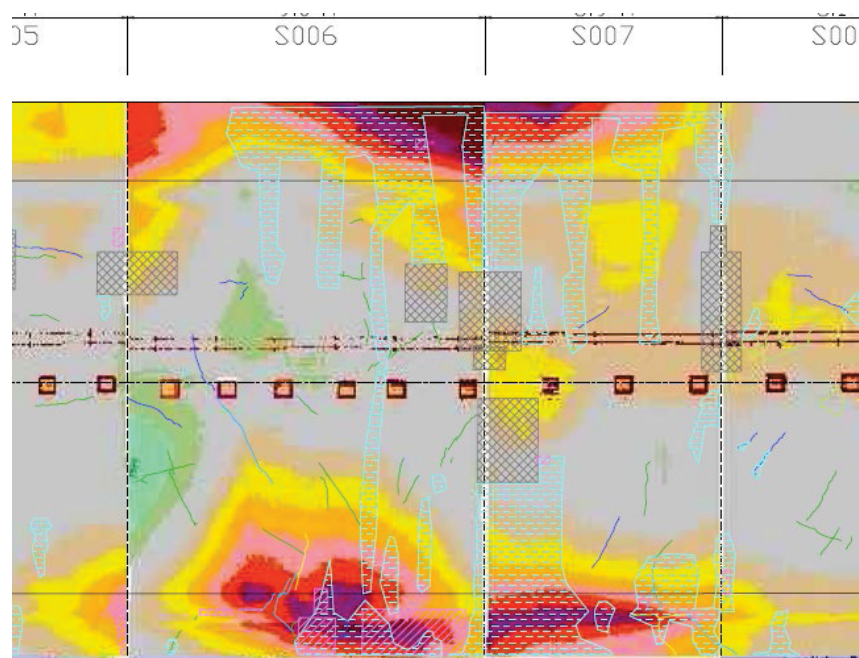


図 3-78 スパン毎展開図での色付け

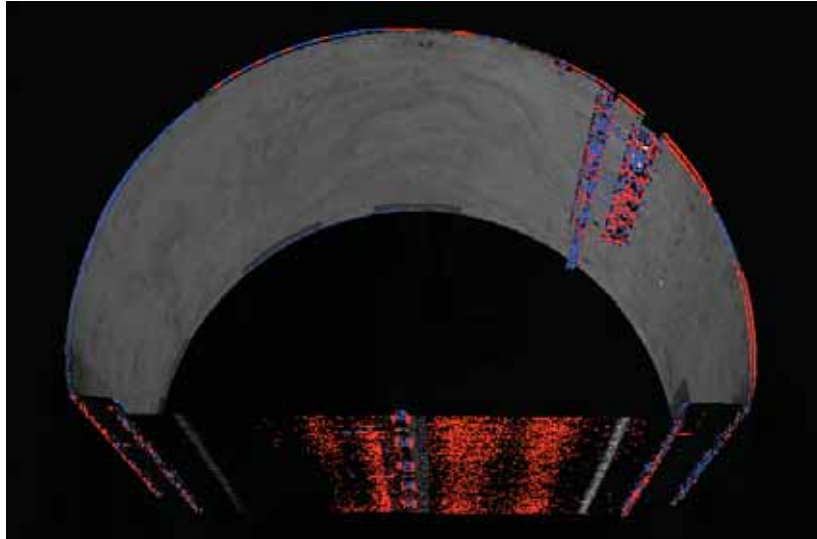


図 3-79 点群での色付け

2) その他の3次元データ解析

当該トンネルにおける変形や附属物の変位などの状況により、コンター解析の他、変形が疑わしい箇所の横断面生成や縦断解析、坑内の建築限界解析などを必要に応じ実施する。

(7) 変状展開図

画像解析により得られた変状の位置や規模を、市販の CAD ソフトにより変状展開図として生成する。変状展開図は、従来からの変状表現に加え、必要に応じ展開画像やコンター解析結果を重畳表示することで、それぞれの相関が確認でき、健全性判断や補修設計の支援とすることができる。

3.5.3 茨城県フィールド実証

点検支援技術を用いたユースケースの策定を目的とし、茨城県管理のトンネルにてフィールド実証を実施した。以下、実証内容を記載する。

(1) 対象トンネル

- ①朝日トンネル (L=1,784m) 県道石岡つくば線 2012年完成 NATM 片側1車線
- ②竜黒磯トンネル (L=328m) 県道日立山方線 1995年完成 NATM 片側1車線
- ③山方トンネル (L=193m) 一般国道118号 1988年完成 矢板 片側1車線

(2) 計測日時

- | | | |
|----------|------------|-------------|
| ①朝日トンネル | 2020年1月21日 | 17:00~19:30 |
| ②竜黒磯トンネル | 2020年1月22日 | 15:00~19:30 |
| ③山方トンネル | 2020年3月12日 | 17:00~20:00 |

(3) 走行条件

計測区間内は原則として 50km/h で走行。

計測区間外は周囲の交通の流れに合わせて走行し、交通規制は必要としない。

雨天時 : 計測開始後、雨天の場合は止むまで待つ。計測開始前に雨天の場合と予備時間を超過して雨天の場合は次回日程調整し延期。



図 3-80 走行計測状況

(4) 計測作業の流れ

計測の流れを以下に示す。

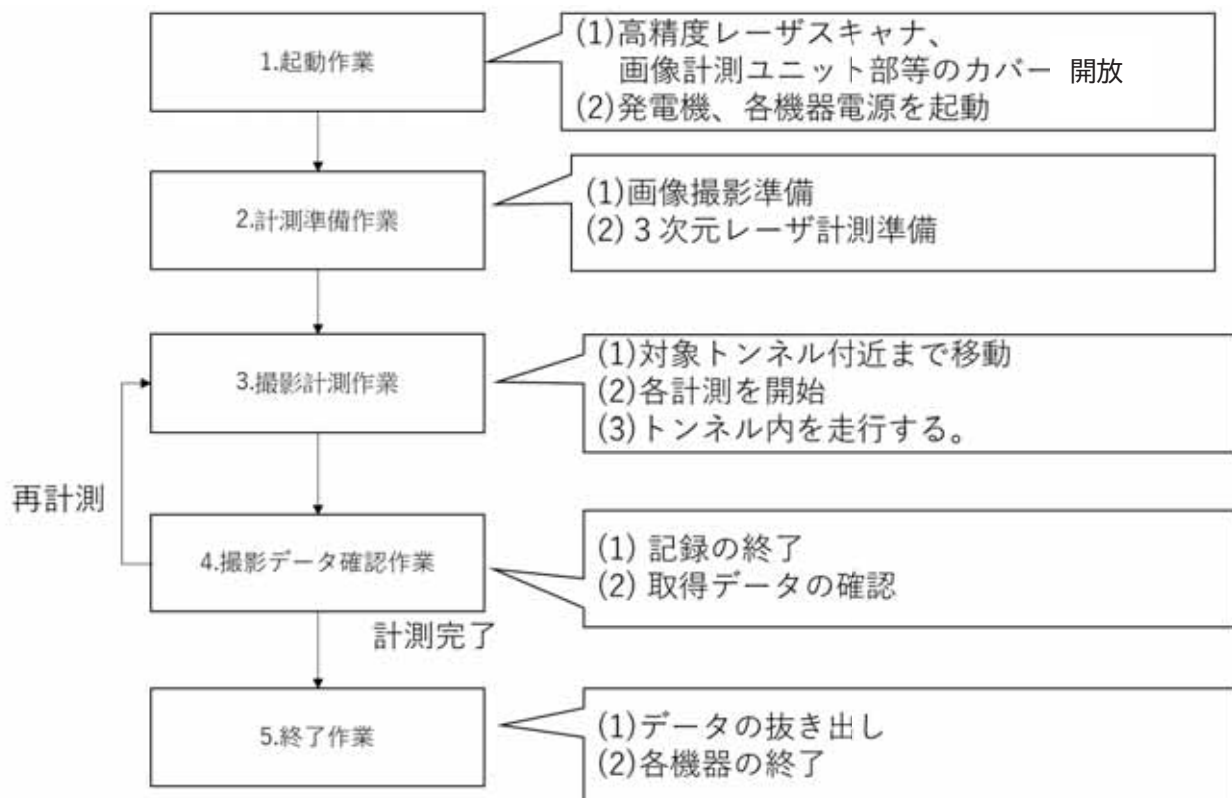


図 3-81 計測作業の流れ

(5) 計測結果

①3次元点群データ



図 3-82 ①3次元点群

②展開画像データ

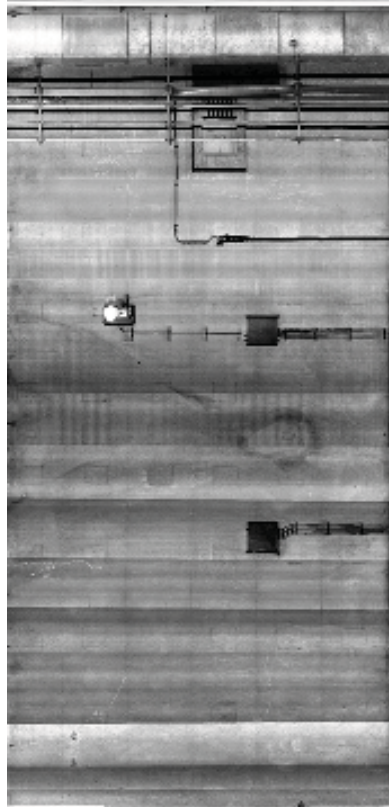


図 3-83 ②展開画像

③変状・補修跡写真

ひび割れ，うき，はつり，豆板の撮影画像を以下に示す．

この撮影画像は，変状・補修跡を個別に撮影したのではなく，②の展開画像から切り出したものである．

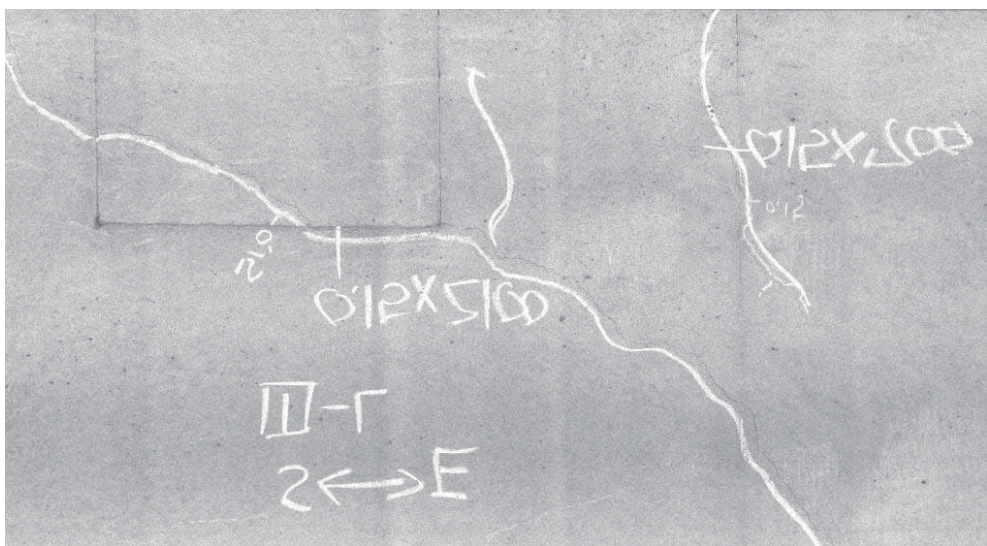


図 3-84 ③ひび割れ

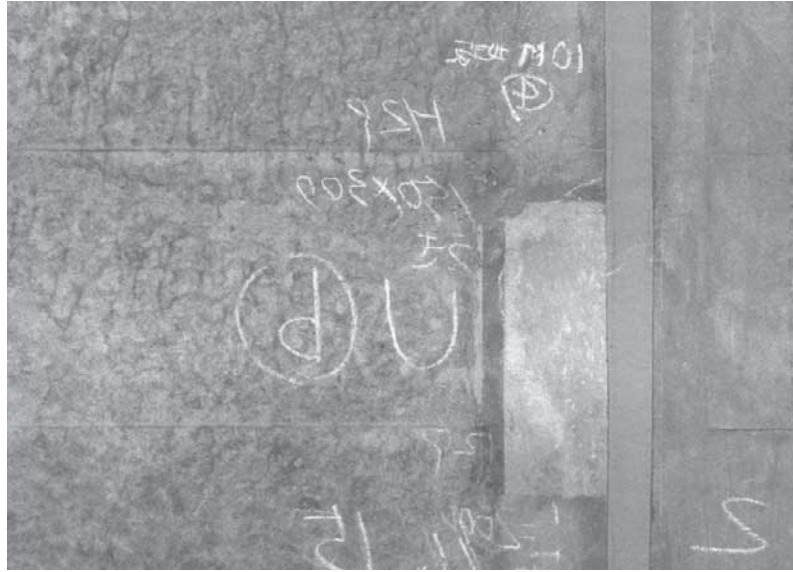


図 3-85 ③うき

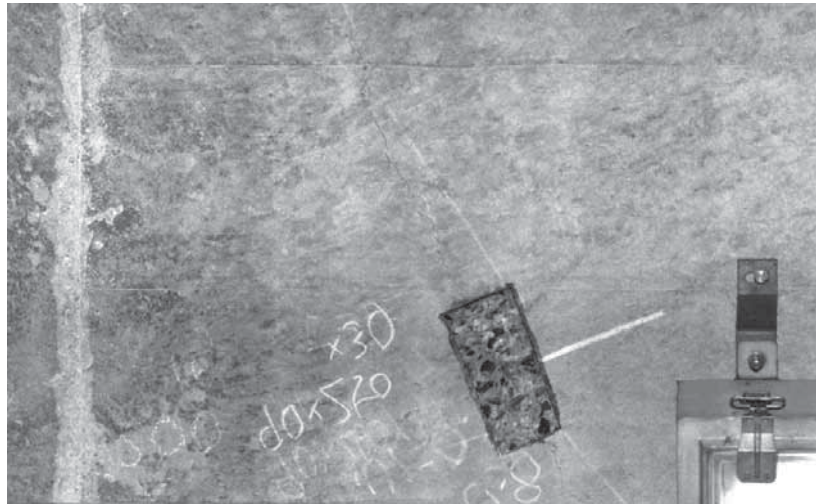


図 3-86 ③ハツリ跡

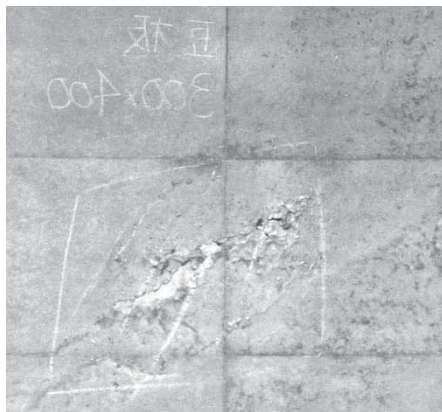


図 3-87 ③豆板

④変状展開図

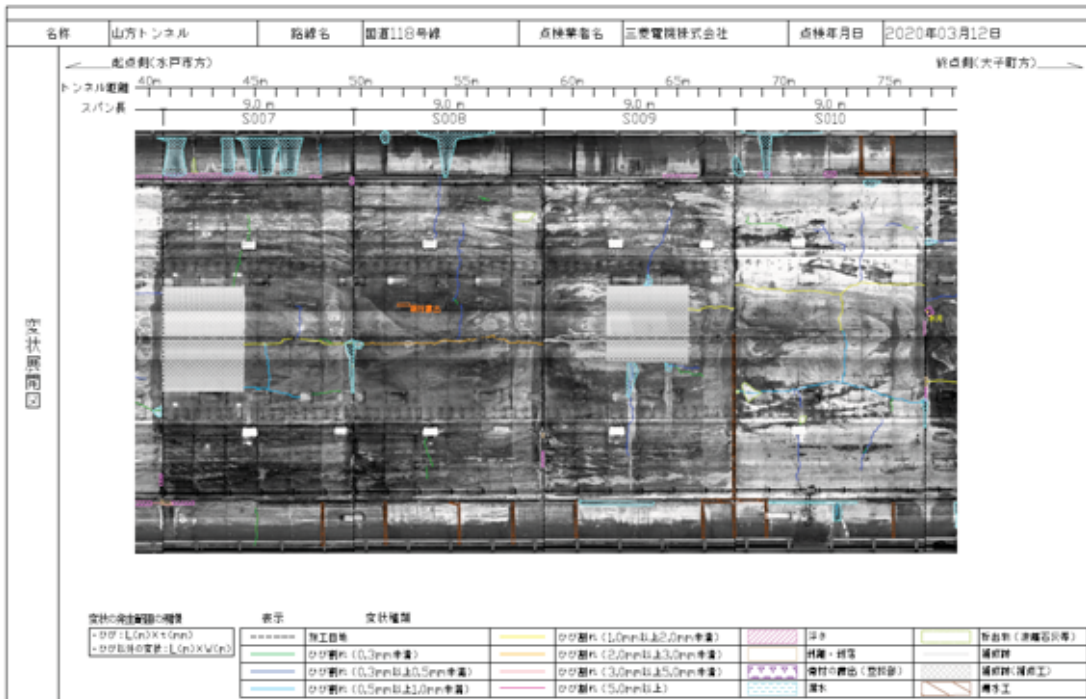


図 3-88 ④変状展開図

⑤変状写真台帳

■ 点検調査 変状写真台帳【様式D-1】

フリガナ	路線名	茨城県道39号	点検業者・点検者名	三菱電機株式会社	点検年月日	2020年01月21日
名称	題目TN(1/5)	管理番号	調査業者・調査技術者名	調査年月日		
写真番号	施工スパン番号 S0001 変状番号 21		写真番号	施工スパン番号 S0001 変状番号 23		
変状部位	対象箇所 部位区分		変状部位	対象箇所 部位区分		
変状区分	変状種類	ひび	変状区分	変状種類	ひび	
健全性	点検・調査後 措置後		健全性	点検・調査後 措置後		
変状の発生範囲の規模	幅0.62m×高さ0.67m		変状の発生範囲の規模	幅0.73m×高さ0.46m		
前回点検時の状態			前回点検時の状態			
調査(方針)			調査(方針)			
措置(方針)			措置(方針)			
メモ			メモ			
写真番号	施工スパン番号 S0001 変状番号 22		写真番号	施工スパン番号 S0001 変状番号 24		
変状部位	対象箇所 部位区分		変状部位	対象箇所 部位区分		
変状区分	変状種類	ひび	変状区分	変状種類	ひび	
健全性	点検・調査後 措置後		健全性	点検・調査後 措置後		
変状の発生範囲の規模	幅2.67m×高さ0.17m		変状の発生範囲の規模	幅0.09m×高さ0.96m		
前回点検時の状態			前回点検時の状態			
調査(方針)			調査(方針)			
措置(方針)			措置(方針)			
メモ			メモ			

※ たたき落とし、締直しを実施した場合は、実施後の写真を添付すること。
※ 剛壁物の取付状態に関する異常写真は別途、任意の書式でとりまとめること。

※ 応急対策を実施した場合は、その実施状況が分かる写真を添付すること。
※ 変状の発生範囲の規模とは、対象を行う際に参考となる変状の長さや面積をいう。

図 3-89 ⑤変状写真台帳

(6) トンネル点検データ管理システム プロトタイプの構築

① トンネル点検データ管理システムの概要

フィールド実証では、トンネル点検データ管理システムに、前述の(5)の計測結果を投入した。

以下、トンネル点検データ管理システムの特徴を記載する。

■現況表示

- ・MMSD で取得した道路や鉄道沿線の高密度・高精度な点群データや画像データを活用し、クラウドやサーバー上に 3 次元仮想空間を構築
- ・3 次元仮想空間内で測量と同等の精度で離隔距離や設置スペースの検討、配線長の算出、干渉チェック等が可能となり、工事計画・設計業務の現地作業を軽減
- ・点検履歴や劣化度、変状記録などの維持管理に関わる情報を 3 次元仮想空間内で容易に確認でき、現地に行かずとも経年変化を踏まえた補修計画の立案が可能

■維持管理情報の一元管理

- ・従来、キロポストやキロ程で管理されてきた施設や設備を高精度な絶対座標を持つ 3 次元仮想空間内で管理し、施設・設備の位置や相互関係を明確化
- ・部門ごとに管理された台帳データと点検・補修結果を一元管理し、3 次元仮想空間内に関連づけて表示することにより部門間の情報共有を促進
- ・タブレット等で現地から各種情報の閲覧ができ、現地作業時の情報共有も可能・点群データと維持管理情報の連携により、デジタルツインの活用を促進
- ・シミュレーションや BIM/CIM 等で必要となる点群データと維持管理に関わる情報を 3 次元仮想空間から容易に取得でき、3 次元施工シミュレーション等さまざまな業務へのデジタルツインの活用を促進



図 3-90 ①トンネル点検データ管理システムのイメージ

②プロトタイプの構築

茨城県フィールド実証で取得したデータでのプロトタイプ構成を以下に示す。



図 3-91 トンネル点検データ管理システムのプロトタイプの構成

また、プロトタイプのイメージを以降に示す。

健全性判定結果の分布を年度別、スパン別に「可視化」する。3次元点群データで変状位置を確認し、対象箇所の詳細画像データを確認できる。

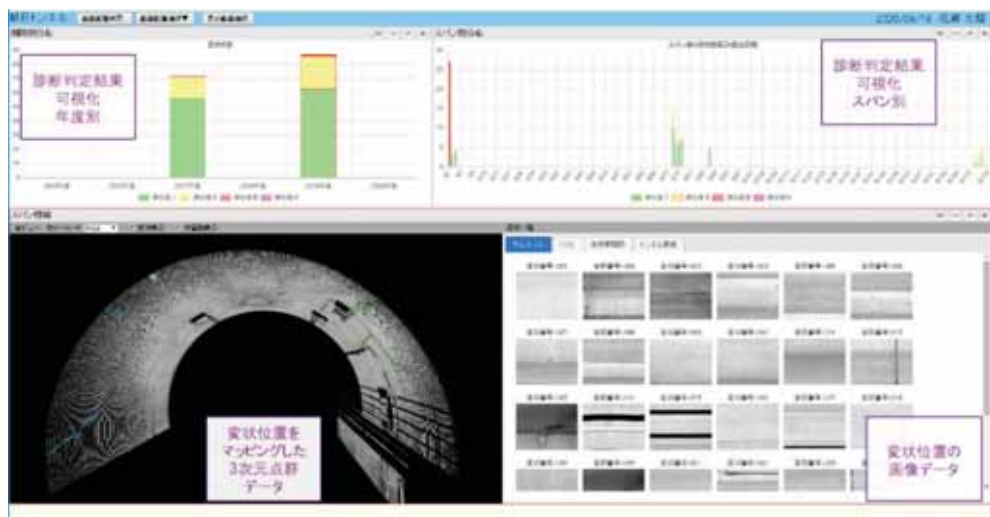


図 3-92 トンネル点検データ管理システムのプロトタイプイメージ(1)

3次元変状位置とスパンにおける展開画像の変状位置、変状の詳細画像も確認できる。

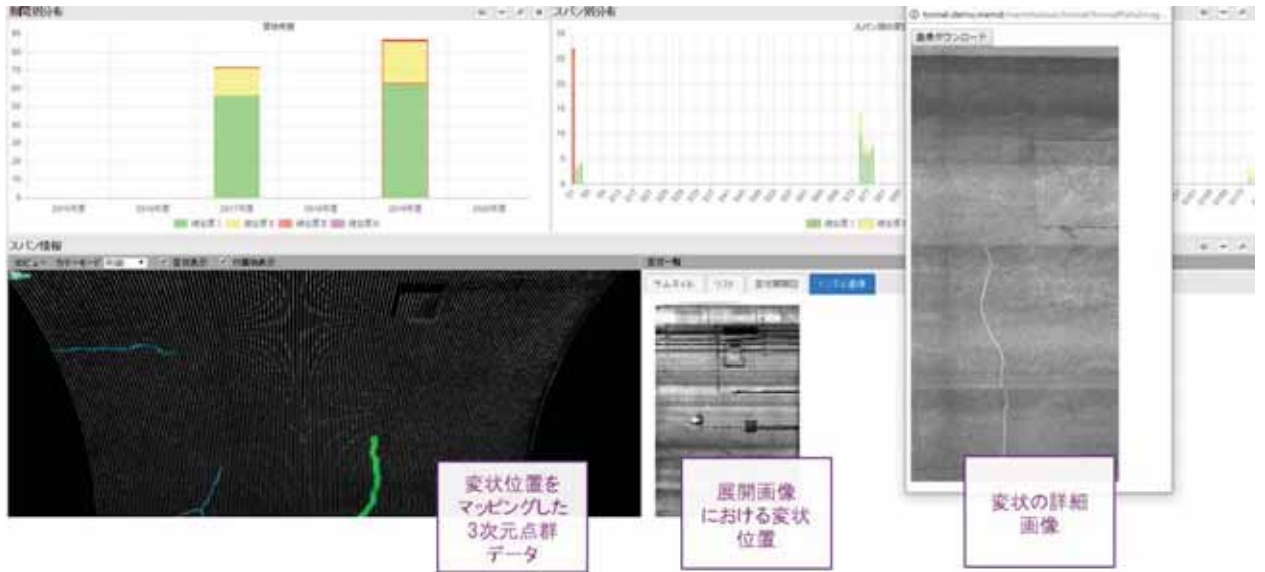


図 3-93 トンネル点検データ管理システムのプロトタイプイメージ(2)

過年度の成果品と最新の成果品データを比較し、経年変化を確認できる。

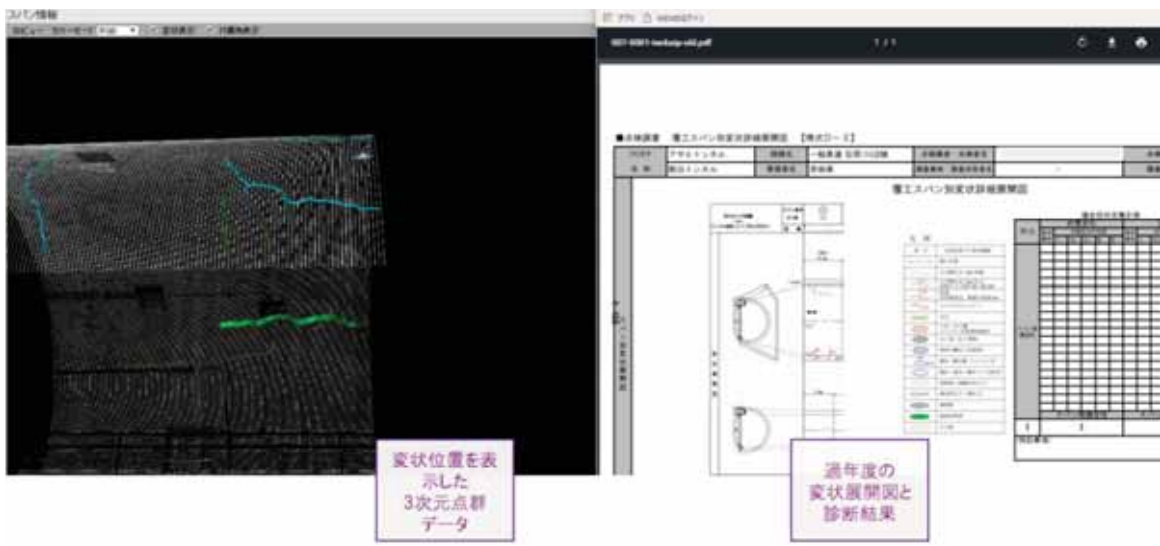


図 3-94 トンネル点検データ管理システムのプロトタイプイメージ(3)

(7) 実証結果

トンネル点検支援に求められる機能，適用範囲を①で定めた上で，新技術の活用により期待される点検業務のユースケースを②に示す。

① トンネル点検の支援に必要な機能，適用範囲

・点検アプローチ箇所

道路トンネル定期点検要領において，二回目以降の点検は覆工表面全面に対し近接目視等により行うことを基本とし，必要な範囲に対して打音検査によるうきなどの有無の確認をしていくとされている。従って，近接目視に代わる手段として，また打音検査範囲のスクリーニングとしての画像計測（点検支援技術）は，覆工表面全面に対し実施する。

但し，走行型画像計測車両を用いる場合，その形状・特性から，以下の箇所は適用が困難であり，近接目視点検を併用する必要がある。

- ・ 坑門
- ・ ジェットファンや照明灯具など，トンネル附属物の裏側
- ・ 内装板の裏側
- ・ 避難坑，避難連絡坑，歩道トンネルなど径の小さいトンネル

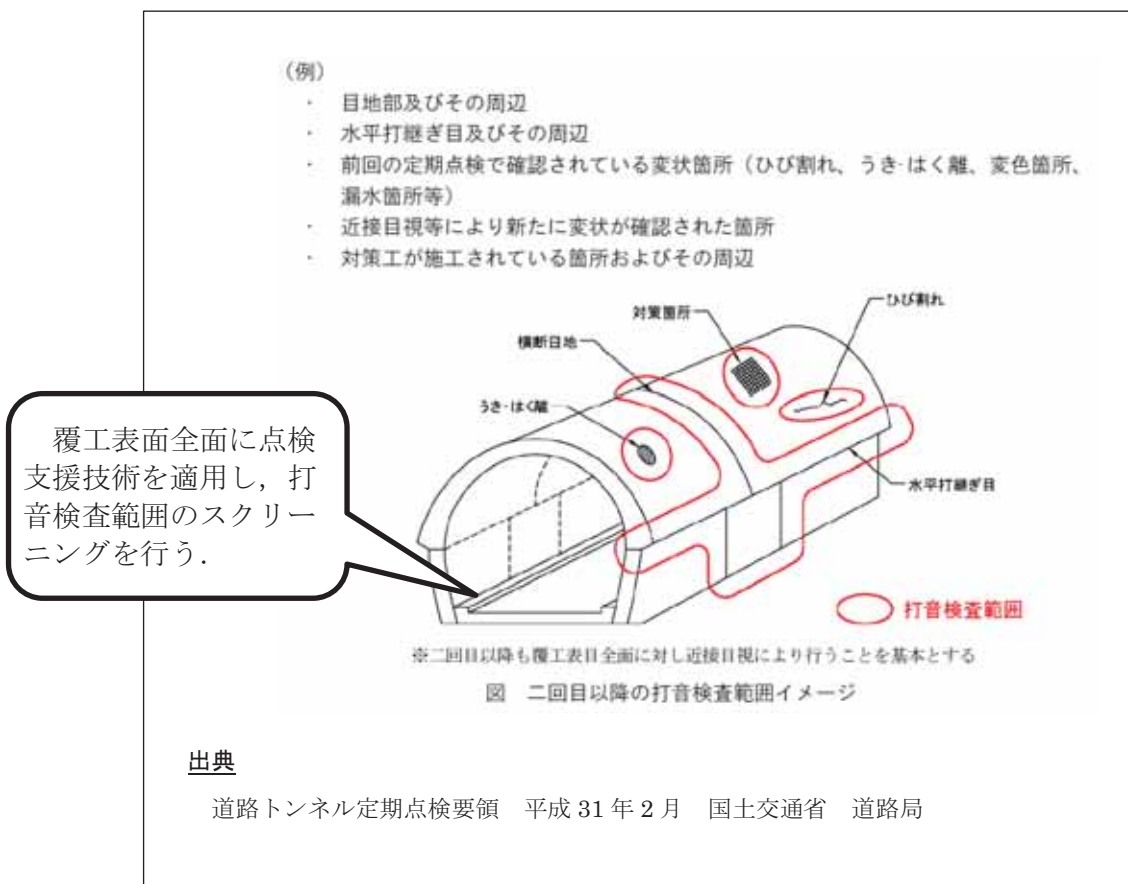


図 3-95 打音検査イメージ

・ 点検時に取得する画像仕様および変状等の記録方法

ア) 画質・分解能

変状のうち圧ぎ・ひび割れについては、健全性の判定において、ひび割れの幅、長さ、位置、密度が確認できる必要がある。ひび割れの幅による判定は、3 mmと5 mmが目安として示されており、これを明確に見分けるためには1 mm/ピクセル程度の分解能が必要と考えられる。また、漏水や鋼材腐食などを画像から確認するうえでは、高分解能で鮮明な画像であるほうが判定しやすく望ましい。

付表-3.1.3 点検時（ひび割れの進行の有無が確認できない場合）の判定の目安例（矢板工法）

対象箇所	部位区分	外力によるひび割れ						判定区分
		幅 ^{補足1)}			長さ ^{補足2)}			
		5mm以上	3~5mm	3mm未満	10m以上	5~10m	5m未満	
覆工	断面内			○	○	○	○	I、II ^{補足3)}
			○				○	II
			○			○		III
			○		○			III
		○					○	II、III ^{補足4)}
		○				○		III
		○			○			IV

補足1) 連続したひび割れ内で幅が変化する場合は、最大幅を当該ひび割れの幅とする。

補足2) 覆工スパンをまたがる連続したひび割れは、覆工スパンをまたがって計測される長さを当該ひび割れの長さとする（覆工スパン単位のひび割れ長さでは評価しない）。

補足3) 3mm未満のひび割れ幅の場合の判定例を下記に示す。

I：ひび割れが軽微で、外力か材質劣化か判断が難しい場合

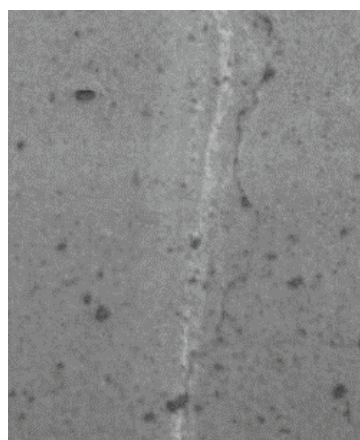
II：地山条件や、周辺のひび割れ発生状況等から、外力の作用の可能性がある場合

なお、地山条件や、周辺のひび割れ発生状況等から、外力の作用が明らかに認められる場合は、その影響を考慮して判定を行うことが考えられる。

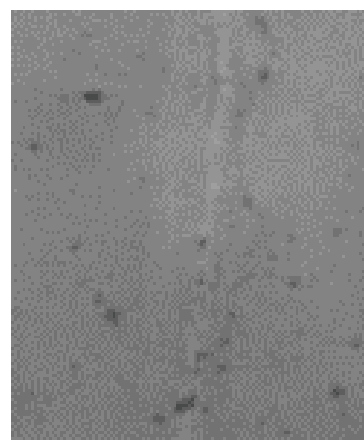
補足4) ひび割れ幅が5mm以上でひび割れ長さが5m未満の場合の判定は、ひび割れの発生位置や発生原因を考慮して、判定を行う。

出典 道路トンネル定期点検要領 平成31年2月 国土交通省 道路局

(参考) 画質によるひび割れの見え方の違い



高分解能の画像



低分解能の画像

図 3-96 画質によるひび割れの見え方の違い

イ) 色情報

うき錆や漏水を判定するうえでは、色情報をもったカラー画像が望ましい。但し、ある程度の階調をもったグレースケール画像であれば判定可能であり、カラー画像は必須要件ではない。

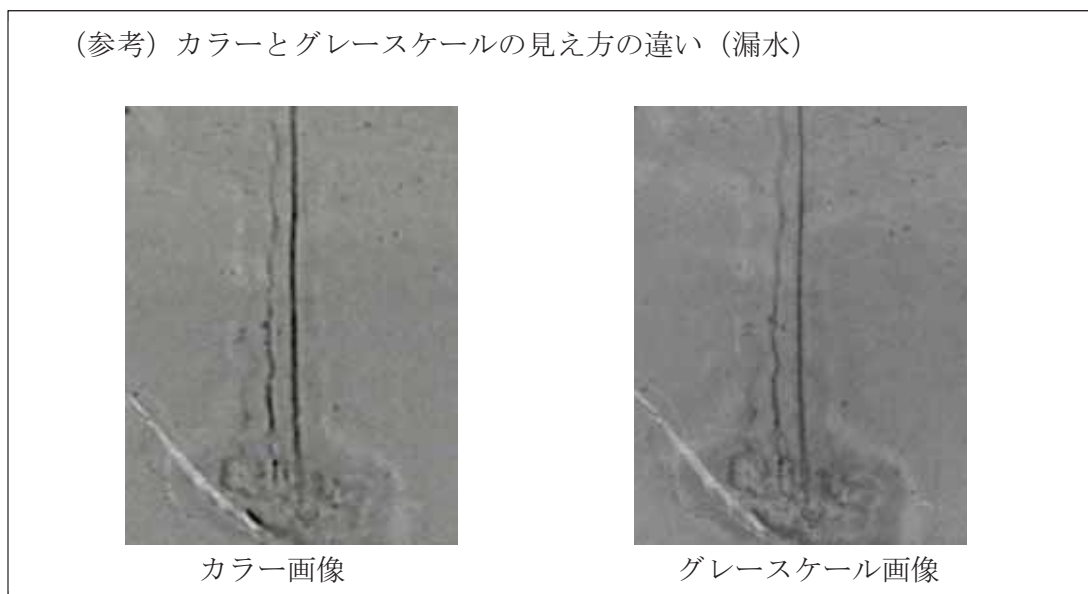


図 3-97 カラーとグレースケールの見え方の違い

ウ) 位置情報, 変状の記録

画像から変状を検出し、その後の補修計画や次回定期点検時に経年比較することを考慮すると、変状には正確な3次元位置情報を持たせる必要がある。

また、変状を記録する変状展開図については、CADにより変状の規模や位置関係を正確に表したものが必要となる。

②新技術の活用ユースケース

点検支援技術(画像計測)は、前述のとおり近接目視に代わる手段として、また打音検査範囲のスクリーニングとしての活用が期待できる。

近接目視点検後に画像計測を行う場合、チョーキングのスケッチを省略(画像にて代用)するなどで、目視点検人員や点検日数の削減が図れ、近接目視点検の作業効率化が見込める。

近接目視点検前に画像計測を行う場合は、画像計測結果から変状展開図を作成し、変状箇所をスクリーニングしておくことで、点検作業(近接目視確認、打音検査)の効率化が図れるとともに、現地での記録は事前作成した変状展開図の修正作業となり、点検日数の削減を図ることが出来る(図 3-98 画像診断用 AI のユースケース、図 3-100 新技術の活用ユースケース)。

画像計測では、従来点検の近接目視をするレベルで覆工変状が確認できるのであれば、従来点検と同じレベルで判定ができる（画像レベルが従来点検の近接目視と同じレベルまで確認できるほど鮮明であるという条件付き）。画像計測で従来点検と同じレベルで誰もが判定ができるような点検要領の整理が重要であり、画像から変状として判定するのが「人」であれば、画像を見て「人」が判定できるような支援内容が必要である。画像計測後に変状展開図を作成するため少しでも作業効率を上げる必要があることから AI 技術を活用することが望ましい。特に支援技術により代替となる項目については積極的な活用が期待される（図 3-99 AI 活用による点検手順）。



図 3-98 画像診断用 AI のユースケース

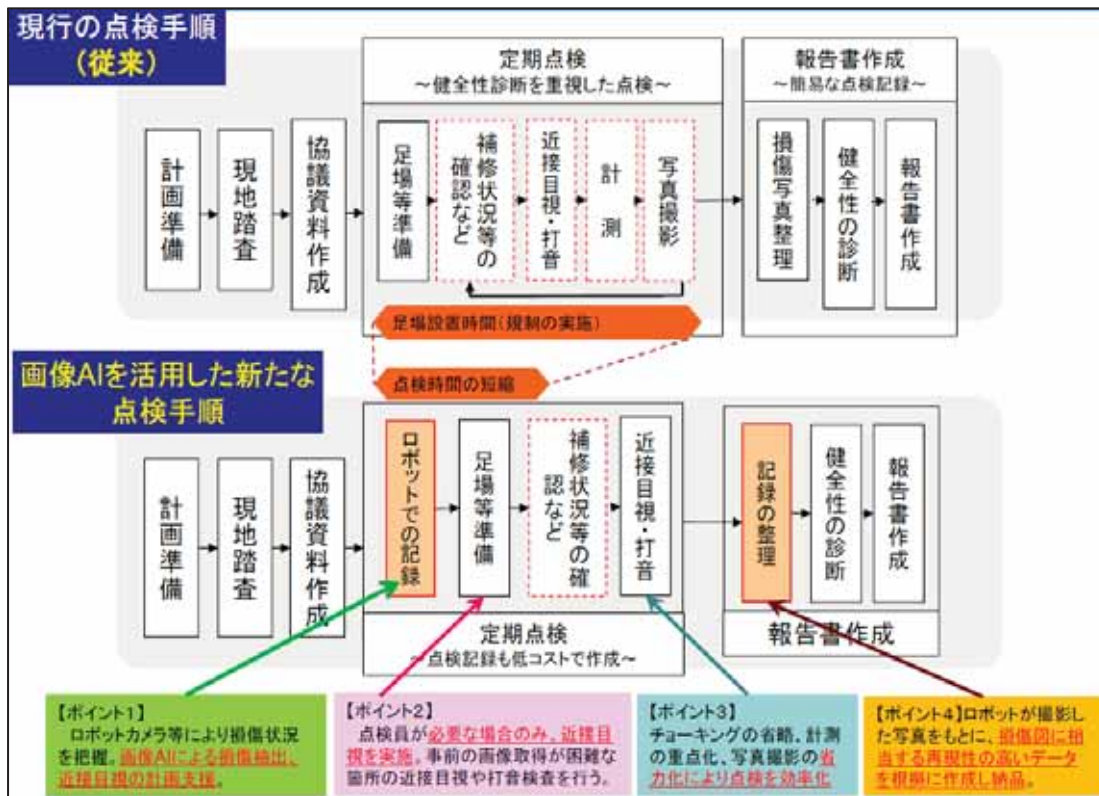


図 3-99 AI 活用による点検手順

また、新技術を用いて以下従来点検の支援が期待できる。

・作業計画における活用

前回点検での点検調書等をデータベースに登録し、ネットワークを介して道路管理者、点検事業者が、閲覧およびダウンロード可能とする。

点検事業者は、前回の点検調書をダウンロードして流用することにより、調書作成の効率化が図れるとともに、点検履歴の管理が容易となる。

・点検調書作成における活用

点検事業者がロボット点検を実施し、AIによるひび割れの抽出や打音検査箇所のスクリーニングを行ったうえで、前回点検データを活用しながら成果品データを作成する。従来の2次元の変状展開図に加え、3次元点群データや変状の3次元モデルを併せてシステムに登録する。これにより、変状の3次元での位置把握、および前回点検結果との経年変化の把握が容易となることで、点検事業者での健全度判定を支援する。

・点検完了後の利活用

道路管理者は、システムに登録された3次元点群データや変状モデルを、併せて登録された点検結果や台帳データとともに確認できることで、統合的な情報によって、変状の措置判断や補修計画・設計などに利活用することが可能となる。また災害発生時には、罹災箇所の3次元点群を取得し、システムに登録された災害前の3次元点群と比較することで、被災規模を把握したり、復旧計画や住民説明の際の基礎データとして活用できる。

・データベースを用いた点検データの利活用

点検支援技術を用い記録・納品された点検結果や、過年度の点検成果をデータベース化し、道路管理者や点検事業者からアクセス可能とすることで、点検業務の効率化・高度化が図れることに加え、点検完了後においてもデータの利活用を図ることができる。

茨城県フィールド実証から、新技術を用いた点検ユースケースを以下に示す。

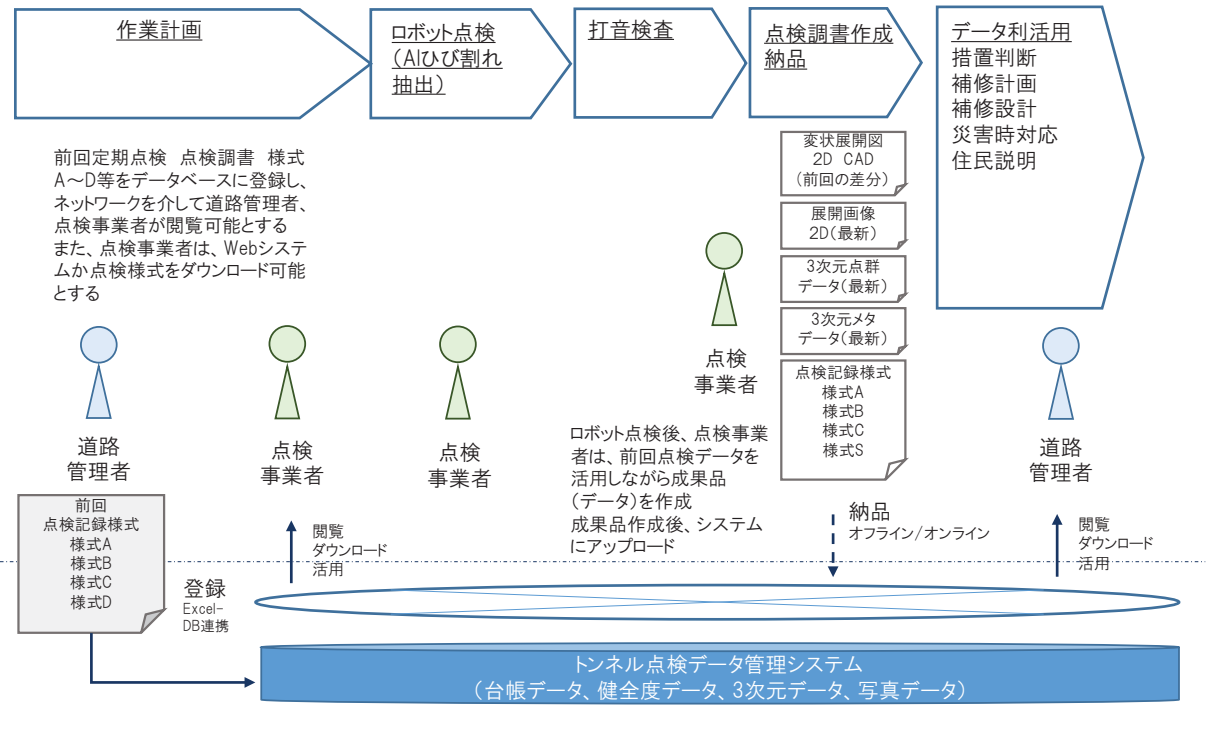


図 3-100 新技術の活用ユースケース

また、茨城県フィールド実証から、新技術を用いて以下従来点検の支援が期待できる。

・展開画像作成・確認による近接目視計画支援

覆工面の展開画像を高精細で作成し、近接目視と同等の変状確認が可能となる。これを近接目視点検に先立って実施することで、正常なことが明らかである箇所は省略するなど、近接目視点検範囲がスクリーニングできる。

・画像解析による変状抽出支援

展開画像を AI により画像解析し、変状を抽出する。必要に応じ目視での画像確認を併用する。近接目視のみで変状を抽出する場合に比べ、品質の安定化やヒューマンエラーの抑制などの支援効果が期待できる。

・展開画像作成による変状写真撮影支援

展開画像から変状箇所を切り出し、現場での変状写真撮影を代用する。写真撮影の省力化に加え、変状を正面から捉えられることで、品質向上が期待できる。

・変状展開図・変状写真台帳の作成支援

抽出した変状は3次元座標を付与し管理することで、変状展開図における変状の位置・形状を正確に記録することができ、変状展開図の品質向上が期待できる。また、変状位置をもとに変状写真を自動的に切り出し、変状写真台帳として生成することで成果品作成の効率化が図れる。

参考文献

- 1) 新技術利用のガイドライン (案), 国土交通省, 平成 31 年 2 月,
- 2) 「橋梁, トンネルの点検支援技術」公募資料, 別添 1 点検支援技術の開発の方向性について, 国土交通省 道路局国道・技術課, 令和 2 年 12 月 15 日
- 3) 「橋梁, トンネルの点検支援技術」公募資料, 別添 2 点検支援技術の公募に係るリクワイアメントについて, 国土交通省 道路局国道・技術課, 令和 2 年 12 月 15 日
- 4) トンネル点検支援技術の高度化に関する研究 研究成果報告書, 新都市社会技術融合創造研究会 トンネル点検支援技術の高度化に関する研究プロジェクト, 令和 3 年 9 月
- 5) 道路トンネル定期点検要領, 国土交通省, 平成 31 年 3 月
- 6) 安田亨, 山本秀樹, 北澤隆一: 時速 50km でトンネル空洞探査高速非接触レーダによるトンネル覆工巻厚・空洞探査を実現, 建設機械施工, Vol.66 No.12, 2014.
- 7) SIP 研究開発課題の各研究概要
http://www.jst.go.jp/sip/dl/k07/booklet_2017_A4.pdf, pp28-29
- 8) 点検支援技術性能カタログ, 国土交通省, 令和 4 年 9 月
- 9) 重田佳幸, 寺戸秀和, 前田洗樹, 山本秀樹, 安田亨: トンネル走行型レーザ計測技術の精度検証, 土木学会トンネル工学報告集, 第 27 巻, I-4, 2017.11
- 10) 久保田英夫, 稲垣正晴: 地中レーダによる水路トンネル調査システムの実用化研究, 土木学会, トンネル工学研究発表会論文報告集, 第 1 巻, 1991.12

4 点検・診断支援技術

4.1 変状抽出手法

本章は、国土交通省総合政策局公共事業企画調整課にて運営された「令和2年度 AI 開発支援プラットフォームの開設準備ワーキング・グループ」において、画像判読 AI 技術の性能評価の試行が実施され、その結果を引用し取り纏めたものである。

4.1.1 点検 AI の活用

(1) 点検支援の必要性

トンネルについては全国で約 1.1 万箇所あり、このうち地方公共団体が管理するトンネルは 0.8 万箇所と約 7 割を占めている。建設後 50 年を経過したトンネルの割合は、10 年後には約 36% に増加し、建設後 50 年を経過し延長 100m 未満のトンネルの割合は、10 年後に約 71% となる。

老朽化対策となる直轄国道での道路管理に関しては、道路法施行規則（平成 26 年 3 月 31 日公布、7 月 1 日施行（抄））の「道路の維持又は修繕に関する技術的基準等」より、「点検は、近接目視により、五年に一回の頻度で行うことを基本とすること。」に対し、地方公共団体の点検要領では、遠望目視による点検も多く（約 8 割）、点検の質が課題となっている。

また、国土交通省では、土木系技術者が存在しているものの減少傾向にあり、町の約 2 割、村の約 6 割では、橋梁保全業務に携わっている土木技術者が存在しない課題を抱えている。インフラ維持管理に携わる民間企業においても、少子高齢化、団塊世代の退職に伴い、担い手不足が問題視されている。

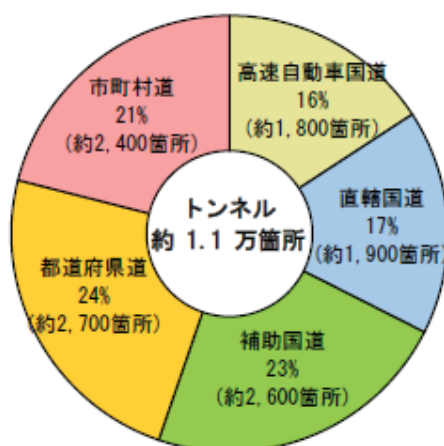
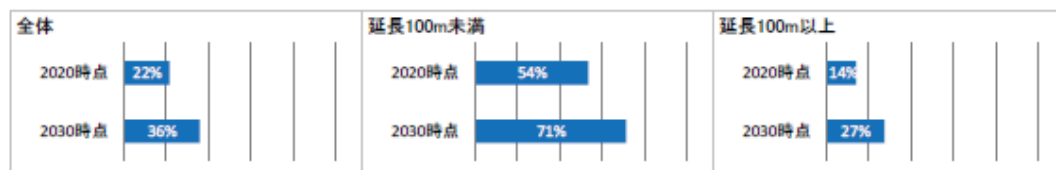


図 4-1 道路種別別トンネル数¹⁾

○ 建設後 50 年を経過したトンネルの割合



※この他、古いトンネルなど記録が確認できない建設年度不明トンネルが約 350 箇所ある。

(出典) 道路局調べ(2020.3 末時点)

図 4-2 建設後 50 年を経過したトンネルの割合

そこで、国土交通省では、社会資本整備審議会道路分科会建議「道路の老朽化対策の本格実施に関する提言」（平成 26 年 4 月 14 日）によって対策が進められている²⁾。また、社会インフラの現場ニーズに基づき、国内外の異分野も含めた産学の技術シーズを踏まえ、「維持管理・災害対応（調査）・災害対応（施工）」の 3 つの重要な場面におけるロボットについて、その開発・導入分野を明確化するなど実用化に向けた方策を検討するため、「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入検討会」を平成 25 年 7 月 16 日に設置し、「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入重点分野」を平成 26 年 12 月 25 日に策定し³⁾、開発・導入検証が進められている。

定期点検は、道路橋の各部材の状態を把握、診断し、当該道路橋に必要な措置を特定するために必要な情報を得るためのものであり、安全で円滑な交通の確保、沿道や第三者への被害の防止を図るため等の橋梁に係る維持管理を適切に行うために必要な情報を得ることを目的に実施している。

近年、団塊世代の退職・少子高齢化により、維持管理に携わる技術者の不足が課題となっているほか、維持管理に携わる技術者に求められているインフラ点検の確実な実施（質）と、生産性の向上が求められている。建設後 50 年を経過したトンネルの割合は、10 年後には約 36% に増加し、建設後 50 年を経過し延長 100 m 未満のトンネルの割合は、10 年後に約 71% となり、生産性の向上と、維持管理に関するクオリティの確保に関する合理的な方策を、早急に進める必要がある。このような背景を踏まえ、トンネルの点検において以下のような課題が挙げられる。

- ① 近接目視のできない箇所が存在する。
- ② 点検効率（生産性の向上）の観点から、広範囲な面積において多くの人員が必要とされる。
- ③ 技術者不足により、点検員の確保が難しい（人材の育成を含む）
- ④ インフラロボットにより取得された点検データの判断は、人力での作業と同等程度の労力が必要となる。

これまで、インフラ点検では、近接目視によって橋梁・トンネルを点検し、ひび割れ等の損傷を確認・記録し、記録と同時に損傷の程度を判別し、必要に応じて詳細点検を行い、診断結果に応じた補修・更新計画を立案・対処してきた。

しかし、上記の課題に対応するためには点検支援技術の活用が必要である。国土交通省

では、インフラ維持管理にロボットの導入を推進しており、ロボットをインフラ現場で活用することにより、生産性の向上・品質の確保を進めているところである。

国土交通省で進めてきた目的の一つは、「人の作業」を支援することとしているが、今後、維持管理を合理的に進める上では、点検時に得られた多くのデータを効率的に弁別し、補修・更新を判断するための診断に必要な情報を提供することが求められている。

そのため、人が点検時に損傷程度の判別を行う行為と同様な機能として、AI等による支援システムを利用し、人と同程度以上の弁別を行う必要がある。

AI開発支援プラットフォームの開設準備ワーキング・グループにおいて、点検時において土木技術的に正しいデータを蓄積した「教師データ」をAI開発者に提供すること、企業等によって開発されたAIシステムの現場での適用に関する妥当性を評価することを目的として、図4-3に示すプラットフォームプロトタイプが運営された。

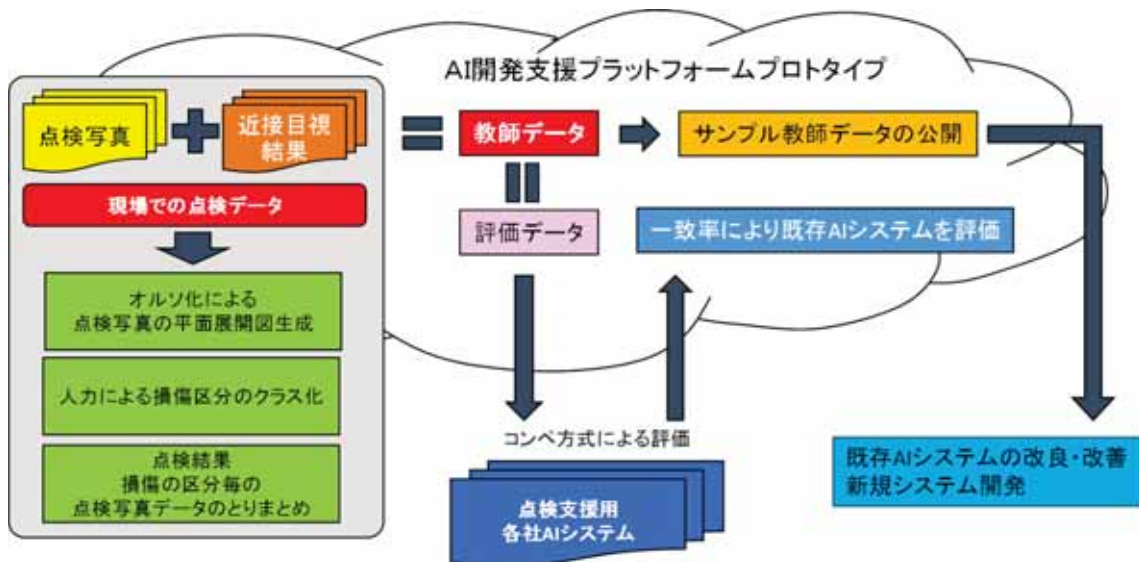


図 4-3 プラットフォームプロトタイプ

図4-4に示すように発注者より貸与される公物インフラ点検によって得られた高精細な点検写真等に対して、損傷・変状の有無の抽出や損傷・変状の種別といった判読結果を付した、データセットを試作する必要がある。データセットとしては、土木技術的に正しい点検時のデータを蓄積した「教師データ」である。

「教師データ」の生成には、定期点検時に取得した橋梁・トンネルの点検写真と近接目視によって記録された点検結果（スケッチ・メモ等）を使用する。

生成された教師データは一部を評価データとして格納し、一部を既存AIシステム開発者や新規AI開発支援のためのサンプル教師データとしてクラウド内で公開する。

教師データの一部となる評価データは、コンペ方式により各社で開発されているAIシステムを評価するためのデータとして提供し、評価対象となる各社AIシステムによって得られた結果を評価する。

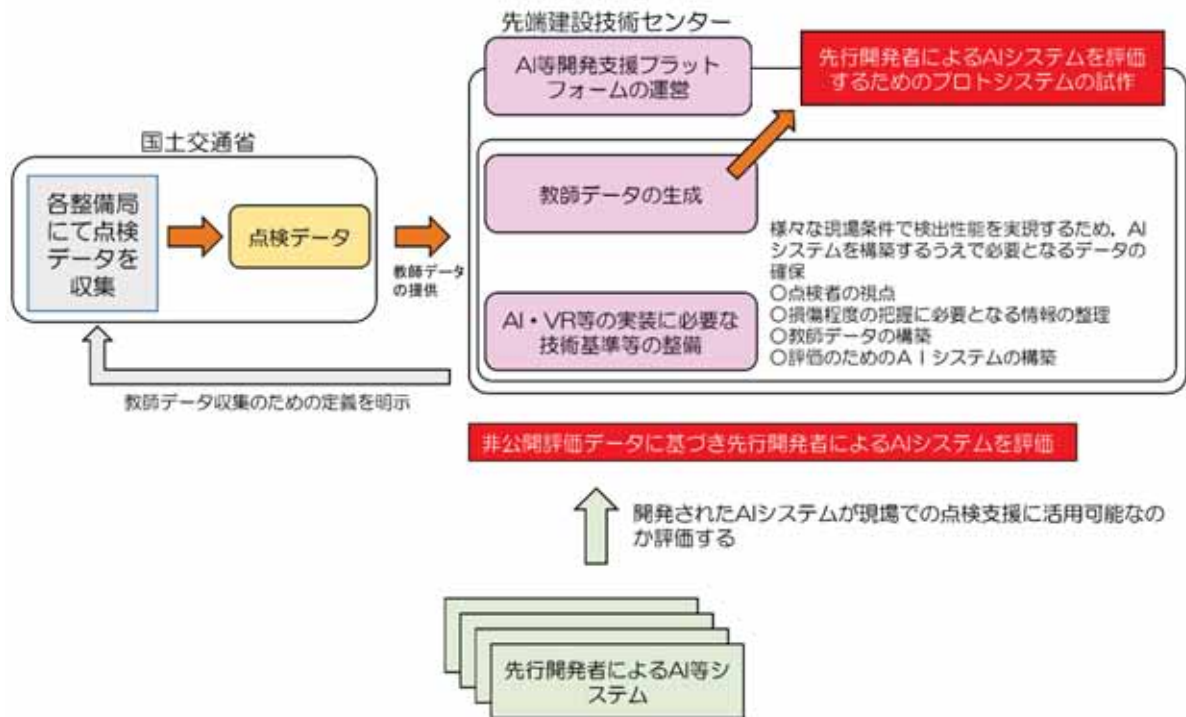


図 4-4 教師データ生成の概要

点検 AI に求める支援内容としては、人力による作業の一部を代替し、効率化、省力化する必要がある、人力と同等の判定、診断が可能か、あるいは最終的に人が診断する際に適正な情報を提供できるかを評価する必要がある。点検支援として、まず手始めに「ひび割れ」に注目し、図 4-5 に示す画像からひび割れ変状が抽出でき、仕分けが可能かを評価するものとする。

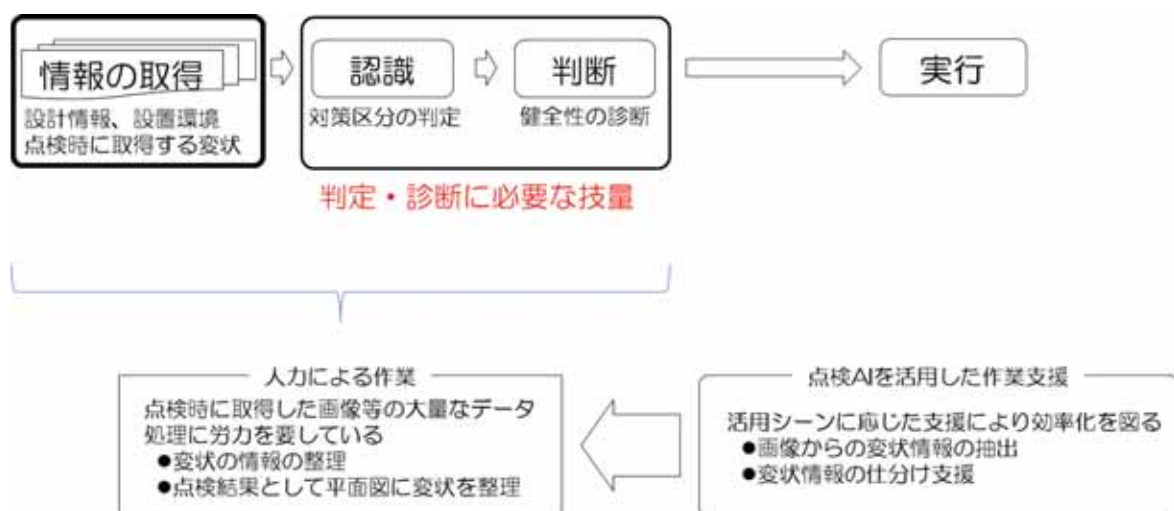


図 4-5 点検 AI に求める支援内容

(2) トンネル点検の対象部位と損傷

トンネルの点検項目は、「道路トンネル定期点検要領」（平成 31 年 3 月）⁴⁾により、以下のとおりである。

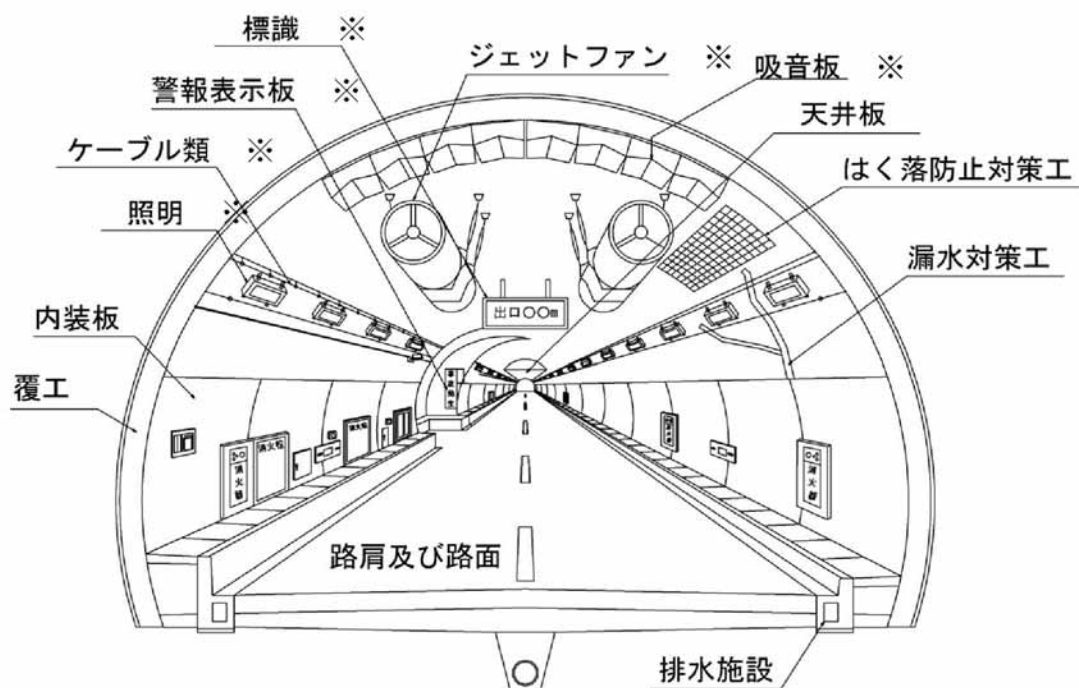


図 4-6 点検対象箇所（トンネル内） ※トンネル内附属物

(3) トンネル本体工の変状種類

判定区分を踏まえ表 4-1 に示す変状種類及び変状区分別に、個別の判定区分及びその目安の例や変状写真例等を示す。

「判定の目安」は「判定区分」を補完するために示すが、定量的に判断することが困難な場合もあり、変状原因が複合していることも考えられるため、機械的に適用するものではなく、現場の状況に応じて判定を行うのが望ましい。

表 4-1 変状種類及び変状区分との関係

変状種類	変状区分		
	外力	材質劣化	漏水
① 圧ざ、ひび割れ	○	○	
② うき・はく離	○	○	
③ 変形、移動、沈下	○		
④ 鋼材腐食		○	
⑤ 巻厚の不足または減少、背面空洞		○	
⑥ 漏水等による変状			○

(4) トンネル本体工の損傷例

トンネル本体工の損傷事例を以下に示す。








①圧ざ, ひび割れ	①圧ざ, ひび割れ
	
②うき, はく離	②うき, はく離
	
③沈下・変形	④鋼材腐食
	
⑤有効巻厚の不足減少	⑥漏水
	

図 4-7 トンネルの損傷事例

4.1.2 教師データの作成と整備

(1) 教師データの整備方針

「道路トンネル定期点検要領」(平成 31 年 3 月)⁴⁾に記載されている点検対象となる部位及び損傷を全て網羅することは難しい。

損傷部位・部材区分について、トンネルに関しては「壁面全体」を対象とすることとし、損傷の種類については、「壁面のひびわれ」の他、「漏水遊離石灰等」について作成することとした。

(2) アノテーションルール・手順

「トンネル壁面のひびわれ」については、「道路トンネル定期点検要領」(平成 31 年 3 月)を基本として、アノテーションルールの検討を行った。

【「道路トンネル定期点検要領」(平成 31 年 3 月)における改訂のポイント】

表 4-2 対策区分の目安例

付表-2.2 点検時(ひび割れの進行の有無が確認できない場合)の対策区分の目安例(矢板工法)

対象箇所	部位区分	外力によるひび割れ						対策区分
		幅 ^{補足1)}			長さ ^{補足2)}			
		5mm以上	3~5mm	3mm未満	10m以上	5~10m	5m未満	
覆工	断面内			○	○	○	○	I、IIb、IIa ^{補足3)}
			○				○	IIb、IIa
			○			○		III
			○		○			III
		○					○	IIb、IIa、III ^{補足4)}
		○				○		III
		○			○			IV

補足 1) 連続したひび割れ内で幅が変化する場合は、最大幅を当該ひび割れの幅とする。

補足 2) 覆工スパンをまたがる連続したひび割れは、覆工スパンをまたがって計測される長さを当該ひび割れの長さとする(覆工スパン単位のひび割れ長さでは評価しない)。

補足 3) 3mm 未満のひび割れ幅の場合の判定例を下記に示す。 I、IIb: ひび割れが軽微で、外力が材質劣化か判断が難しい場合 IIa: 地山条件や、周辺のひび割れ発生状況等から、外力の作用の可能性がある場合 なお、地山条件や、周辺のひび割れ発生状況等から、外力の作用が明らかに認められる場合は、その影響を考慮して判定を行うことが考えられる。

補足 4) ひび割れ幅が 5mm 以上でひび割れ長さが 5m 未満の場合の判定は、ひび割れの発生位置や発生原因を考慮して、判定を行う。

- ・対策区分の目安例が在来工法である、矢板工法に限定された。
- ・覆工スパンに外力によるものと考えられるひびわれが確認された場合は、必要な調査を実施して変状の原因と進行の度合い等を把握した上で判定を行うことが望ましい。

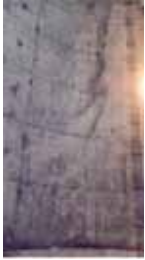




(「外力によるひびわれ」の場合に，表による区分を適用.)

- ・覆工スパンをまたぐ連続したひびわれは，覆工スパン単位では評価しない.

これらの改訂を踏まえ，教師データ作成のアノテーションルール策定にあたっては，「損傷区分」でなく，「点検結果の整理区分」とし，対策区分 I～IV と混同しないよう，あくまで一次仕分けとしての位置づけとする.

また，「トンネル壁面のひびわれ」以外の他の損傷項目については，今後の課題とする.

表 4-3 トンネル壁面における点検結果の整理区分（ひびわれ）

定期点検要領に基づく対策区分、ひび割れ変状例		アノテーションに必要なポイント		
		点検結果の整理区分	ひび割れ幅	ひび割れ長さ
I		ひび割れが生じていない、または生じていても軽微で、措置を必要としない状態	I-1	教師データを構築するうえで、ひび割れの健全な状態を画像として収集可能な状態としては、“表面が綺麗な状態”、ひび割れと間違えてしまう“くもの巣”、“段差”、“型枠跡”、“汚れ”など、損傷以外で判断に影響しそうな属性を収集する。
			I-2	0.3mm未満
			I-3	0.3mm以上～1mm未満
			I-4	1mm以上～2mm未満
			I-5	2mm以上～3mm未満
II-b		ひび割れがあり、その進行が認められないが、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、監視を必要とする状態	II-b	3mm未満
			5m以上～10m未満	
II-a		ひび割れがあり、その進行が認められ、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態	II-a1	3mm未満
III		ひび割れが密集している。またはせん断ひび割れ等があり、構造物の機能が低下しているため、早期に対策を講じる必要がある状態	II-a2	3mm以上～5mm未満
			5m未満	
IV		ひび割れが大きく密集している。またはせん断ひび割れ等があり、構造物の機能が著しく低下している。または圧入があり、緊急に対策を講じる必要がある状態	III-1	3mm以上～5mm未満
			5m以上	
			III-2	5mm以上
			IV	10mm未満
				10m以上

(3) 撮影条件と画像仕様

トンネルを撮影するうえで、推奨する撮影条件と画像仕様を表 4-4 に示す。

表 4-3 推奨する撮影条件と画像仕様

<p>点検終了後、点検状況を図面と対比(位置関係の確認)することから、以下の条件設定が必要となる。</p> <ul style="list-style-type: none"> トンネル全周の二次元展開図を作成することから実寸法に合わせた適正なアスペクト比を確保する。 撮影時に 4K カメラ、高画質ビデオカメラを使用する場合、画像解像度は、1.5mm/画素以下を推奨する。 撮影時にラインカメラを使用する場合、0.3mm/画素以下を推奨する。 <p>撮影時の留意点 ※環境因子を考慮し、2回目以降は、初回撮影の状況に合わせる必要がある。 (変状部位の変化(季節変動)を考慮する。) ※トンネルの設置環境に応じ、靄(もや)・霧(きり)・湿度等に留意する。</p>	
	仕様
カメラ機種	<p>手持ち：4K カメラ以上を推奨する。</p> <p>走行型：高画質ビデオカメラ(エリア、グローバルシャッター)およびラインカメラを推奨する。</p>
撮影設定	<p>トンネル内部の環境・現場条件に応じ、絞り・シャッタースピード・ISO 感度等の調整を行う。</p> <p>また、試写を必ず実施し、鮮明に撮影されていることを確認すること走行型での撮影に関しては、以下を留意する。</p> <ul style="list-style-type: none"> 内装版、白い壁面、結露などの場合、ハレーション防止の対応が必要となる。 煤などによる黒い壁面は、照明照度、計測速度、シャッタースピードの調整が必要である。 鮮明な画像を取得するため、十分な照明を当てて撮影する(ISO 感度を同時に調整)。
ラップ率	二次元平面展開の合成可能なラップ率を任意に設定する。
画質モード	最高画質モードを推奨する。
画像フォーマット	高精細な JPEG 形式を基本とする。

(4) 教師データの作成

トンネルに関し、トンネル本体工については道路トンネル定期点検要領⁴⁾p. 22 にあるように、材質劣化または漏水に起因する変状はそれぞれの変状単位で、外力に起因する変状は覆工スパン単位で整理を行う。

(5) 教師データ作成の留意点

「(1)教師データの整備方針」にて述べたように、今年度の教師データ作成について、トンネルについては「壁面のひびわれ」の他、「漏水遊離石灰等」を対象とする。

トンネルの壁面ひびわれに関わる損傷の検出対象については、道路トンネル定期点検要領_付録-2 変状種類と対策区分及び附属物の異常判定区分 p. 44～p. 47 に示す対策区分をもとに 表 4-2 にて策定した点検結果の整理区分（Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，Ⅳ）のアノテーションを手作業により行う。

アノテーションに関しては、整理された区分についてセグメントを設定し、それぞれ別レイヤーで作成する。

このとき、ひびわれと 1 画素単位で一致させ、レイヤー毎にひびわれ状況を確認し、最大幅、延長、ひび割れ間隔等の情報を付与し、色分け等によりラベル付けを行う。（ひびわれの評価では、ひびわれの位置・幅・間隔が要素となるため、入力画像の解像度（1 画素に映った大きさが何 mm であるか）を統一するか、「画像の解像度」が点検写真の情報として付加されている必要がある。）

点検写真と近接目視による点検結果を比較する際、点検写真を最大拡大してもひびわれが確認できない場合には、データから排除、若しくは点検写真の実態に応じて修正する。

なお、アノテーション作業に関しては、不正確な教師データの生成を回避するため、点検結果の整理区分（Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，Ⅳ）のサンプルデータを事前に学習し、仕分け作業は 3 人以上で実施することで個人差や作業ミスによる不正確なデータが混入しないようにすることが望ましい。また、有識者が仕分け作業結果の採否を判断することが望ましい。

アノテーション作業にあたっては、「4.1.2(2) 教師データ作成のためのアノテーションルール・手順」に準拠するものとする。

(6) 点検結果区分の整理

点検写真及び近接目視による記録内容からの判断手順は以下のとおりとする。

- ① CAD 図面を入手する
- ② 橋梁の場合は格間 1 枚，トンネルの場合は 1 覆工スパンを単位とする点検写真を用意する。
- ③ 点検写真と CAD 図面のアスペクト比を合わせる
- ④ 近接目視による記録データを用意する
- ⑤ 損傷程度の区分及び点検結果の区分を整理するため，区分（Ⅰ～Ⅳ）毎のレイヤーを用意する。
- ⑥ 近接目視による記録に基づく，点検結果の整理区分（Ⅰ～Ⅳ）を確認する。
- ⑦ ひびわれ検出支援ソフトに基づきひびわれを検出する
- ⑧ 近接目視による記録内容を属性情報（場所・位置・〇〇等）とし，点検写真と 1 対 1 で関連付けさせる。

関連付けに関しては，区分Ⅰ～Ⅳ）毎のレイヤーを用いることとする。（ルールに基づく仕分けを実施する。）

- ・ ひびわれを確認し，最大ひびわれ幅を確認
- ・ ひびわれの間隔（連続性）を確認

- ⑨ 区分(a～e)又は(I～IV)毎のレイヤーにひびわれに関する属性情報を関連付ける。
 - ・近接目視結果に明示されていないひびわれについても確認のうえ整理する。
- ⑩ 整理されたデータの確認(クロスチェック)
- ⑪ 属性情報をエクセル等に記録(データベース化)する

(7) アノテーション手順

アノテーションによる、教師データ作成手順を表 4-5 に示す。

表 4-5 教師データ作成手順（トンネル：覆工ひび割れ）

AI開発支援プラットフォームの開発準備WGへの意見照会（点検データ取得～アニメーション） 道路トンネル(壁面)ひび割れ編

損傷の形状のアニメーションにおける手順		留意点
アニメーション作業の事前準備	1. CAD図面の入手する	3次元データを活用しても可能
	撮影された点検写真を格間毎に整理	撮影された素材に応じてモザイク若しくは幾何補正によって整理
	3. 点検写真とCAD図面のアスペクト比を合わせる	1:1のスケールとする
	4. 近接目視による記録データを用意する	近接目視での点検時のスケッチ等の記録を入手
アニメーション作業	点検結果の整理区分に関するポイント(生成ルール)に基づき個別にレイヤーを作成する	
	近接目視による点検記録に基づく点検結果の整理区分(I～IV)を確認する	点検結果の整理区分に関するポイント(生成ルール)に基づき点検結果の整理区分(I～IV)を確認する
	ひび割れ支援ソフトに基づき二次元展開図からひび割れを検出する	ひび割れ箇所をレイヤー別(区分I～IV)に検出する
	各レイヤーにおける点検結果の整理区分(I～IV)について、ひび割れ対象となる箇所に対して画素単位塗りつぶしによるラベル付けを行うと同時にひび割れと1画素単位で一致させ、点検写真からレイヤー毎にひび割れの状況を確認し、ひび割れ幅、長さの情報を付与する	レイヤー別に検出した格間内のひび割れ箇所と近接目視による点検記録を照合する
	近接目視による点検記録内容を属性情報とし、整理している点検写真と1対1で関連付けしておく	管理番号、部材名、位置情報、点検日時等の情報を点検写真に付与する
	整理されたデータの確認(クロスチェック)	個人差や作業ミスによる不正確なデータが混入しないように3人以上でチェックする
	アニメーションによってレイヤー毎に整理された点検写真を保存(保存形式はJPEG)する。保存に関しては、点検画像とラベル付けされた情報と属性情報を一致させる。	作業では使用するソフトに依存するものとし、作業後のデータセットとしての保存形式は、JPEGによりデータをクラウド内に保存する 保存に伴い、画つぶれ等がないようにすること

※橋梁と違う点がある枠になる。
 ※損傷程度の区分が点検結果の整理区分（I～IV）になる。
 ※点検写真からレイヤー毎にひび割れの幅と長さの情報を付与

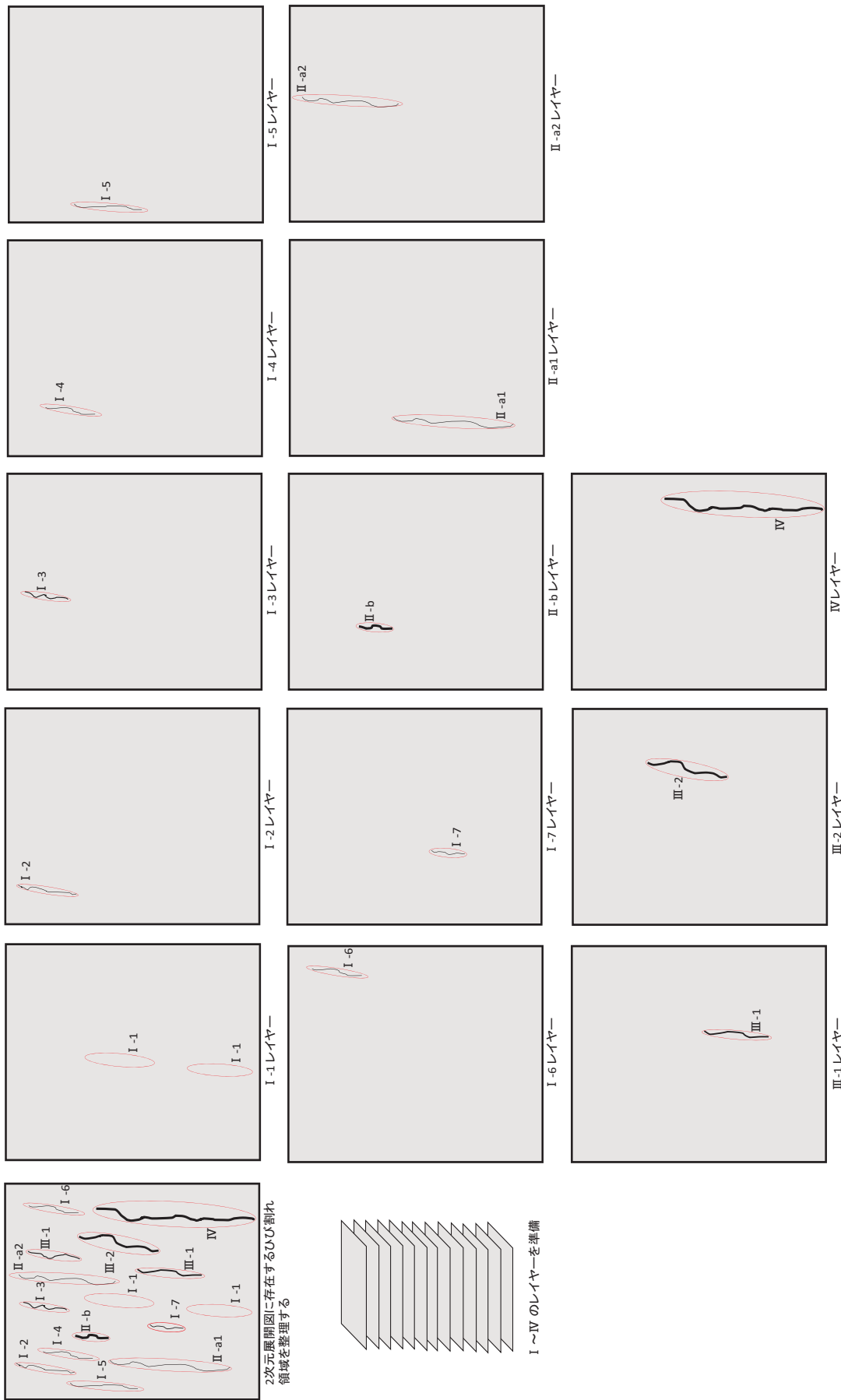


図 4-8 アノテーションに利用するレイヤー

① CAD図面を入手する.

公物インフラ点検で得られたCAD図面を入手する.
(定期点検結果の損傷図をCAD図で表したもの)

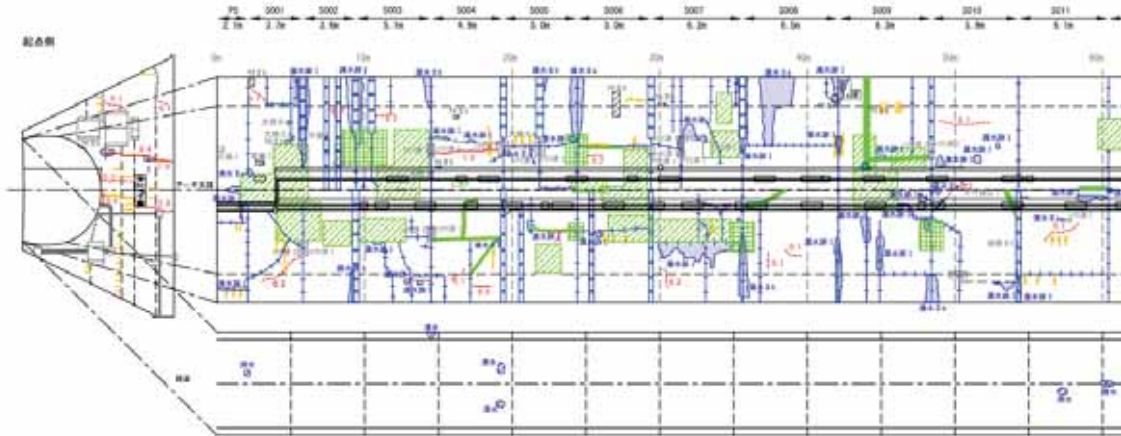


図 4-8 CAD図面

② 撮影された点検写真を二次元展開図に加工する.

撮影された素材に応じてモザイク若しくは幾何補正によって整理.



図 4-9 覆工スパンに加工

- ③ 点検写真とCAD図面のアスペクト比を合わせる。
1:1のスケールとする。

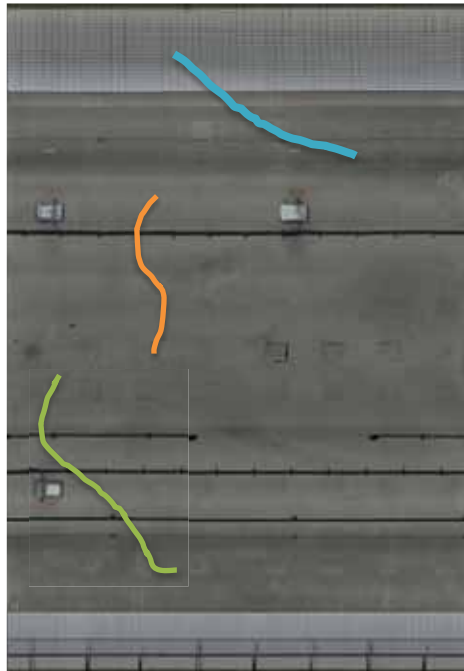


図 4-10 点検写真とCAD図面のアスペクト比を合わせる

- ④ 近接目視による記録データを用意する。
近接目視での点検時のスケッチ等の記録を入手。



図 4-11 近接目視点検時の記録を入手

- ⑤ 点検結果の整理区分に関するポイント(生成ルール)に基づき個別にレイヤーを作成する。



図 4-12 個別レイヤーを作成

- ⑥ 近接目視による点検記録に基づく点検結果の整理区分(I~IV)を確認する。

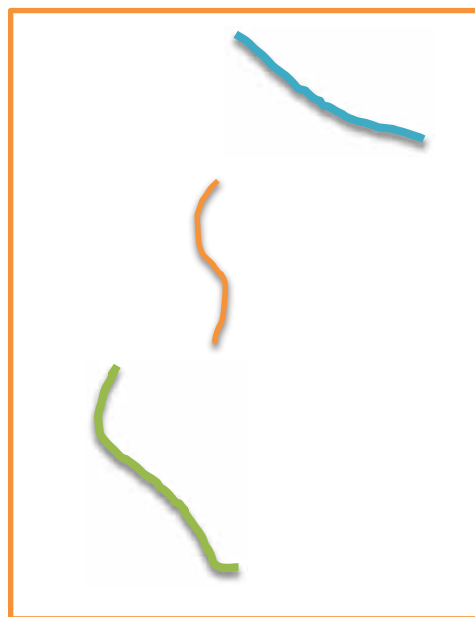


図 4-13 点検結果の整理区分を確認する

- ⑦ 覆工スパン毎にひびわれ支援ソフトに基づきひびわれを検出する。
覆工スパン内のひびわれ箇所をレイヤー別に検出する。



図 4-14 ひび割れ検出結果

- ⑧ 各レイヤーにおける損傷程度の区分(I～IV)についてポリラインによるラベル付けを行う。

ひびわれと1画素単位で一致させ、点検写真からレイヤー毎にひびわれの状況を確認し、ひびわれ幅、長さの情報を付与する。

レイヤー別に検出した展開図内のひびわれ箇所と近接目視による点検記録を照合する。

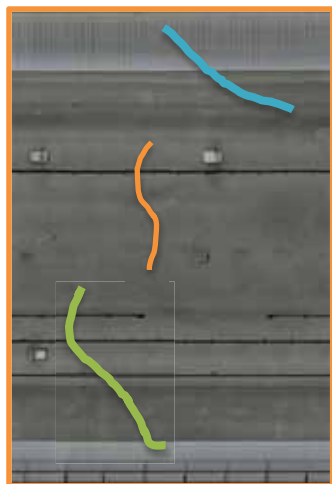


図 4-15 ポリラインによるラベル付け

- ⑨ 近接目視による点検記録内容を属性情報とし、点検写真と1対1で関連付けしておく。
管理番号，部材名，位置情報，点検日時等の情報を点検写真に付与する。

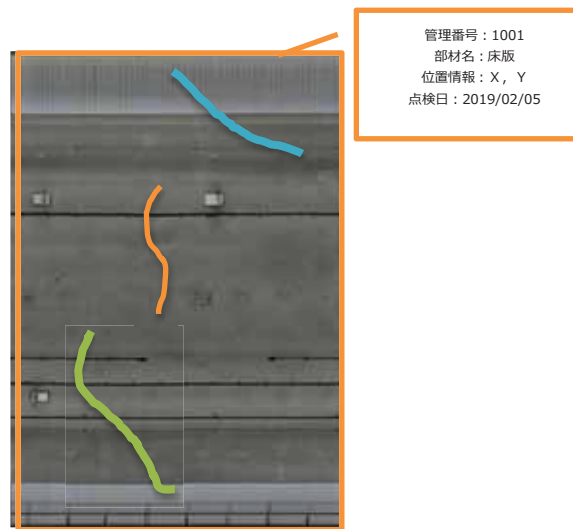


図 4-16 点検写真と1対1で関連付け

- ⑩ 整理されたデータの確認(クロスチェック)

個人差や作業ミスによる不正確なデータが混入しないように3人以上でチェックする。

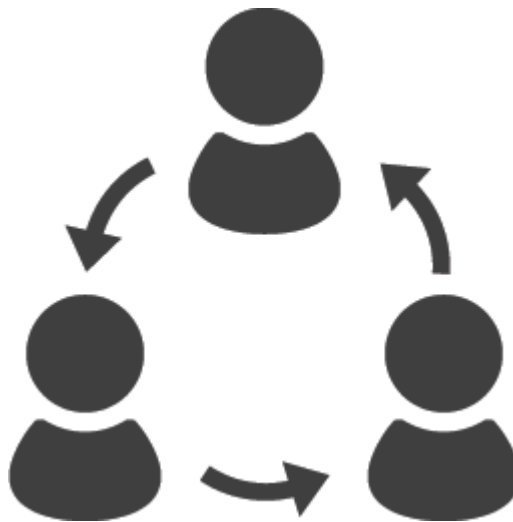


図 4-17 データをクロスチェックする

⑩ データの保存

アノテーション作業で使用するソフトに依存するものし、作業後のデータセットとしての保存形式は、PNG あるいは高精細 JPEG によりデータをクラウド内に保存する。保存に伴い、画つぶれ等がないようにする。

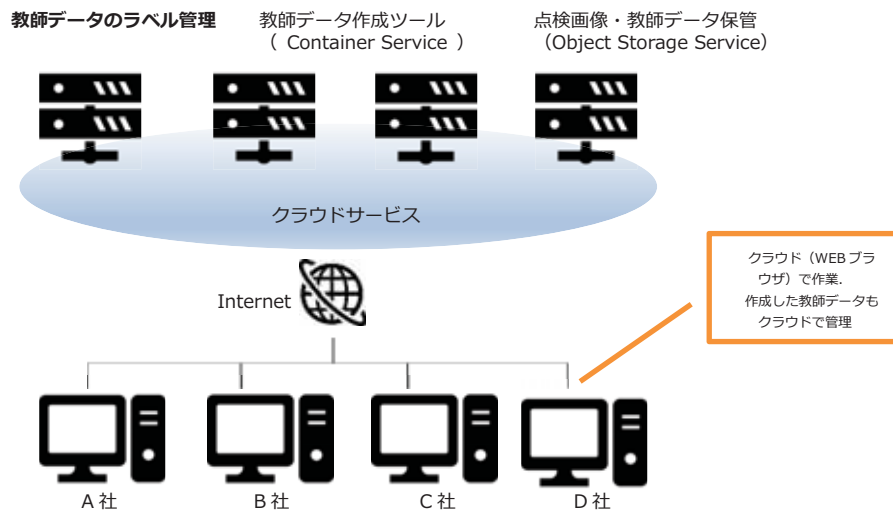


図 4-18 教師データの保存

4.1.3 活用シーンに応じた点検 AI 性能評価手法

(1) 評価指標

AI システムにより点検写真に示されるひび割れの損傷程度の区分を弁別した場合、どの程度正確に弁別しているかを評価する必要がある。既に開発されている AI システムに生成された教師データの中から評価用に提供されるデータについてひび割れの損傷程度の区分を弁別し、その結果について評価し、既存 AI システムの現場への適用レベルを評価するとともに今後の AI システムの開発支援に寄与することを目的とするものである。

評価指標に関しては、AI 開発における基本的な概念である混同行列を念頭においた、Precision (適合率)、Recall (再現率)、F 値を用いて数値算出を行った。

表 4-4 混同行列

	Positive	Negative
True	TP:ひび割れを正しく検知できた	TN:ひび割れてないところを正しく検知できた
False	FP:ひび割れてないところをひび割れとして誤検知した	FN:ひび割れを見過ごした

Precision (適合率) : Positive を確認する指標

- ・全てが True (FP=0) なら, Precision は 100%となる.
- ・誤検知に対して有効なのかを測定する指標.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

Recall (再現率) : Negative を確認する指標

- ・ False Negative が 0 なら, Recall は 100%となる.
- ・検出の見逃しに有効なのかを測定する指標.
- ・誤検知は点検時の確認でカバーできるが, 見逃しスルーしてしまう事も考えられる.

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

従って, Precision よりも Recall を重視する必要がある.

F 値 : 検知したいのものが検知されているかどうか評価したい場合

$$F = \frac{TP}{TP + \frac{1}{2}(FP + FN)}$$

なお, 今回の評価では, 詳細な精度を求めるものではないことから, 領域の重なりで評価する指標である IoU は除外する.

(2) 活用シーン

評価された AI が, 実点検のどの場面で利用できるのかを明確に判定することが, AI の早期社会実装に繋がるため, 橋梁, およびトンネルそれぞれの定期点検要領に準拠した AI システムの評価レベルを設定し, AI の開発レベルに応じた評価を行うこととした.

トンネルの活用シーンの考え方を図 4-20 に示す.

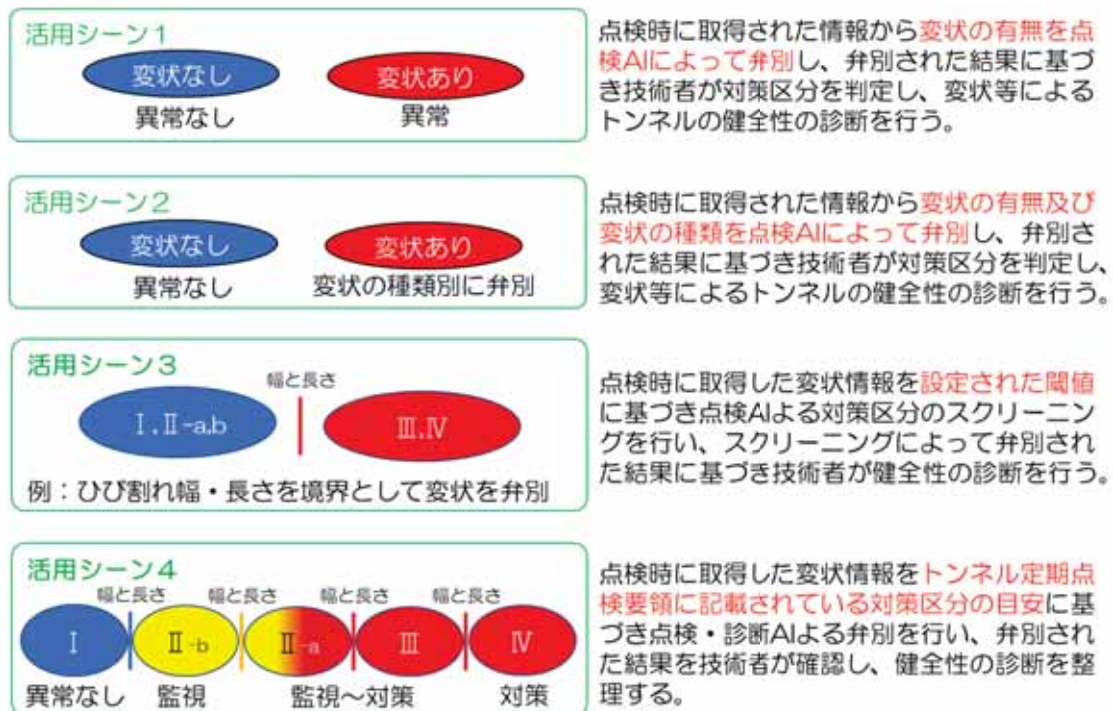


図 4-19 活用シーンの考え方

(3) AI システム評価要領

1) 検知対象データ

トンネル評価用スパン画像 3 枚（下記，画像情報は 3 枚とも共通）

画像サイズ：7,350px×15,132px

スパン実寸：10.5m×21.617m

（周長はアーチスパンではなく，一部歩道を含む画像上の周長）

画素解像度：1.429mm/px

2) 検知結果の提出

トンネル評価用スパン画像に対し，ひび割れ検知 AI を適用し，その結果を提出する．ひび割れ幅の算出を行った場合は，ひび割れ幅の情報も併せて提出する．

表 4-5 検知結果の送付内容一覧

種類	説明	フォルダ
AI 検知結果 (ラスタデータ)	トンネル評価用スパン画像を入力し，ひび割れ推論を行った結果画像. JPEG,PNG 等一般的な画像処理ツールで表示できるファイル形式で格納. ・ファイル命名ルール Raster_ {評価対象ファイル} .{JPG/PNG 等}	Raster
AI 検知結果 (ベクタデータ)	トンネル評価用スパン画像を入力し，ひび割れ推論を行った結果のうち，ベクタ変換をおこなった結果. DXF/DWG, SVG 等汎用的なツールで表示・処理できるファイル形式で格納. ※ひび割れ幅区分に応じ画層に分類すること. ・ファイル命名ルール Vector_ {評価対象ファイル} .{DXF/SVG 等}	Vector
出力結果説明資料	出力結果の説明資料を格納. ・ひび割れ検知結果の見方 ・ひび割れ幅の表示方法・確認方法 等 ファイル名，ファイル形式は任意（一般的なアプリケーションで閲覧可能なこと）	Doc

3) 評価の考え方

以下の考え方に従い、AI 検知性能の評価を 2 種類の方法で行う。

A) 評価対象のひび割れ検知可否の評価

評価者側で評価対象として設定したひび割れが検知されているか否かを評価する。

なお、評価は以下の視点で、トンネル技術者が目視で評価する。

①ひび割れ検知性能評価

検知結果と正解データを技術者が見比べて検知できていると判断できるか評価する。

(一本のひび割れが分断されている、結果がずれている、部分的に検知できていない等でも技術者の判断で検知有無を判定)

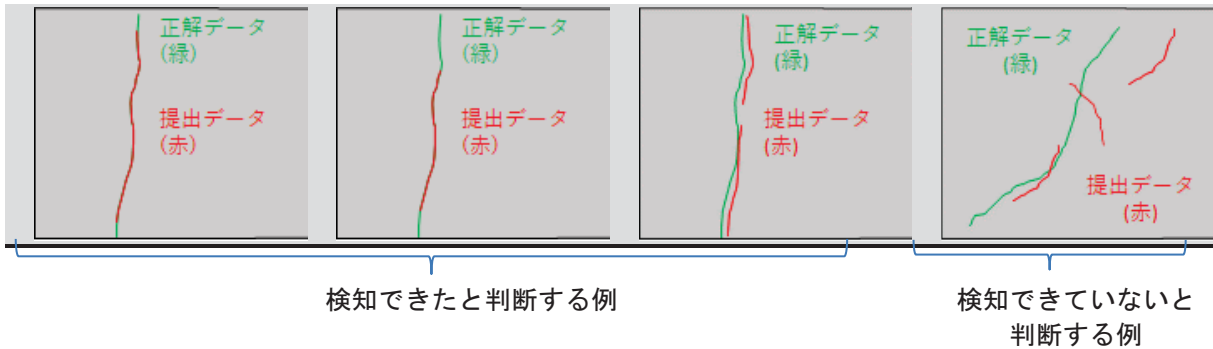


図 4-20 ひび割れ検知の評価例

②ひび割れ幅の算出性能評価

各ひび割れの最大ひび割れ幅が検知できているか否かを評価する。

なお、ひび割れ幅については、以下の通り分類し、それぞれの分類で検知できているかについて技術者が目視で判断する。

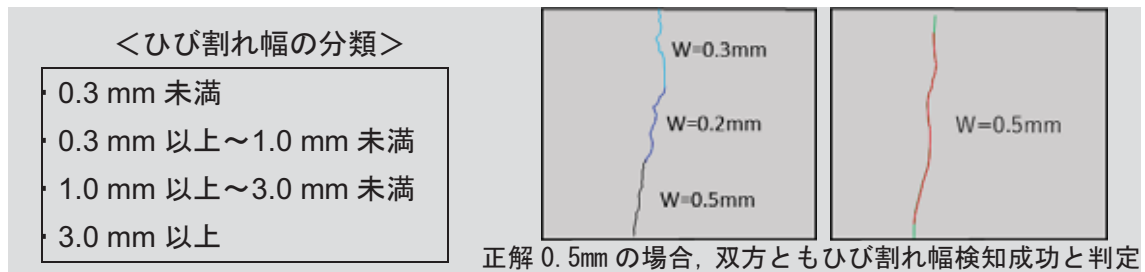


図 4-21 ひび割れ幅の分類と評価例

B) 分割ブロック領域毎のひび割れ検知評価（見逃してはいけない損傷の検知評価）

各社のひび割れ AI が対策区分検討の評価に必要なひび割れ（1.0mm 以上）の検知が行えるかについて評価する。具体的には、10 cm 四方の分割ブロック（メッシュ）ごとにひび割れの存在有無を整理した正解データ（グレーハッチング）と AI で検知されたひび割れデータを重層し、グレーハッチング内に AI 検知結果が存在するか確認する。

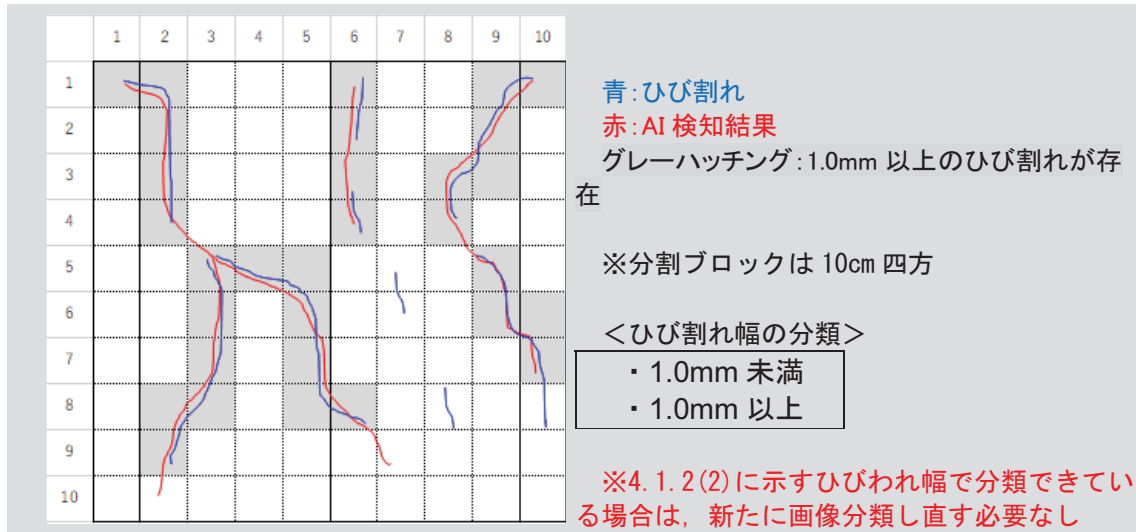


図 4-22 分割ブロックを用いた評価例

4) 評価結果のとりまとめ方法

上記の評価結果は、それぞれ表 4-8 に示す方法でとりまとめを行う。
(整理過程の中で、別の評価指標で整理をする可能性あり)

表 4-6 各評価項目の評価方法（案）

各評価項目	評価方法
A ① ひび割れ検知評価	適合率 (Precision) = 正解検出ひび割れ数 ÷ 全検出ひび割れ数 再現率 (Recall) = 正解検出ひび割れ数 ÷ 全ひび割れ数
A ② ひび割れ幅検知評価	正答率 = 幅算出正解数 ÷ 全評価対象ひび割れ数
B 分割ブロック領域ごとの検知結果	適合率 (Precision) = 正解検出ブロック数 ÷ 全正解ブロック数 再現率 (Recall) = 正解検出ブロック数 ÷ 全検出ブロック数

以上

4.1.4 画像解析技術を活用したひび割れの評価結果

(1) 概要

評価データとしてオルソ写真3枚を提供し、パシフィックコンサルタンツ、三菱電機について、開発中の画像解析AIにてひび割れ解析を実施し、性能評価を行った。

(2) 評価データ及び正解データ

評価データ及び正解データを下記に示す。1.429mm/画素にて撮影した。各データの評価対象範囲は、図4-25において赤枠で囲った範囲とする。

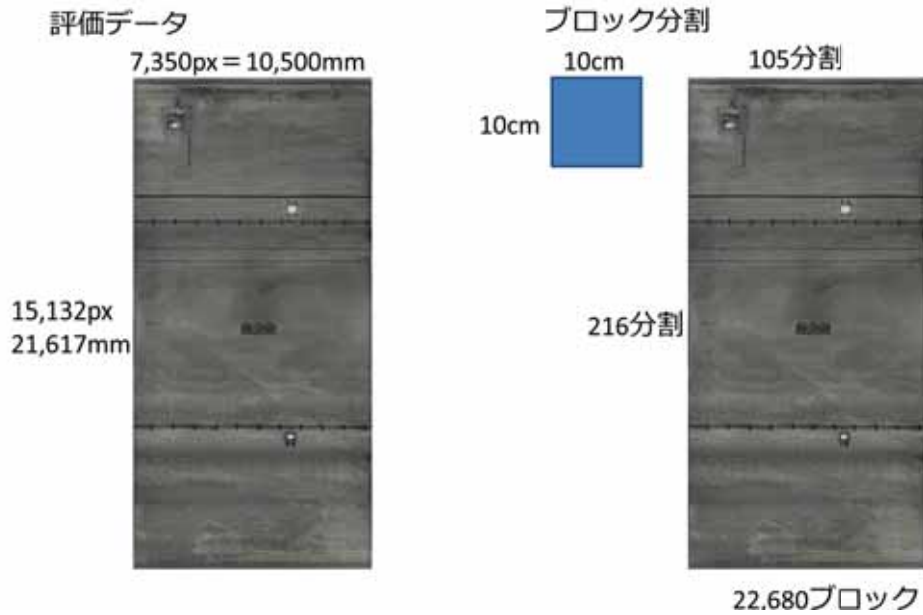


図 4-23 評価データの画像サイズ（トンネル）

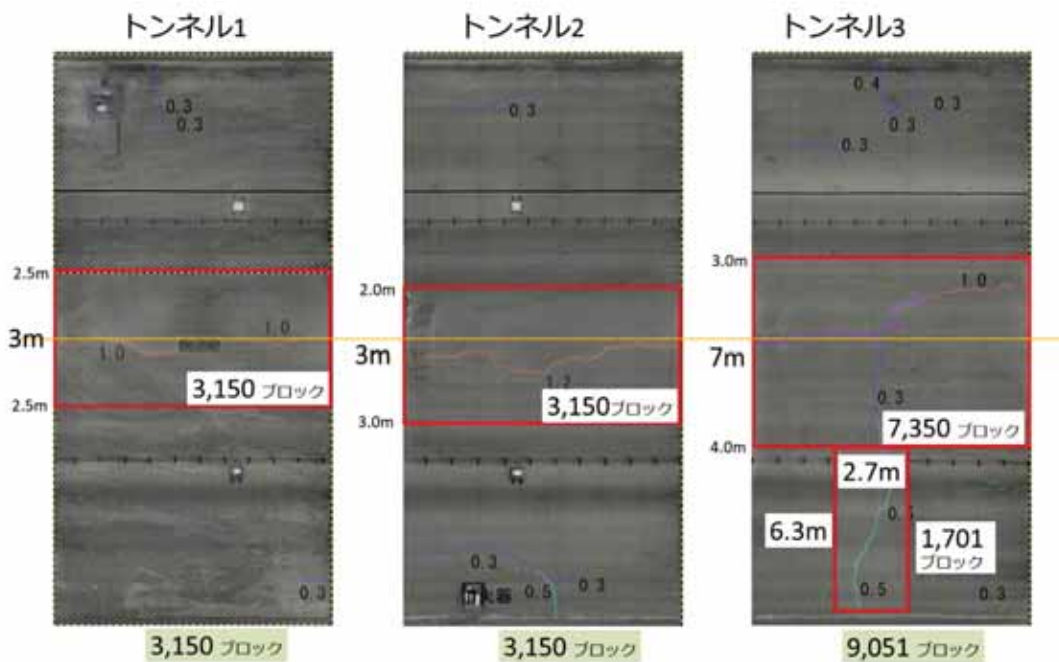


図 4-24 評価対象範囲（トンネル）

各評価データに対する，正解データを下記に示す．

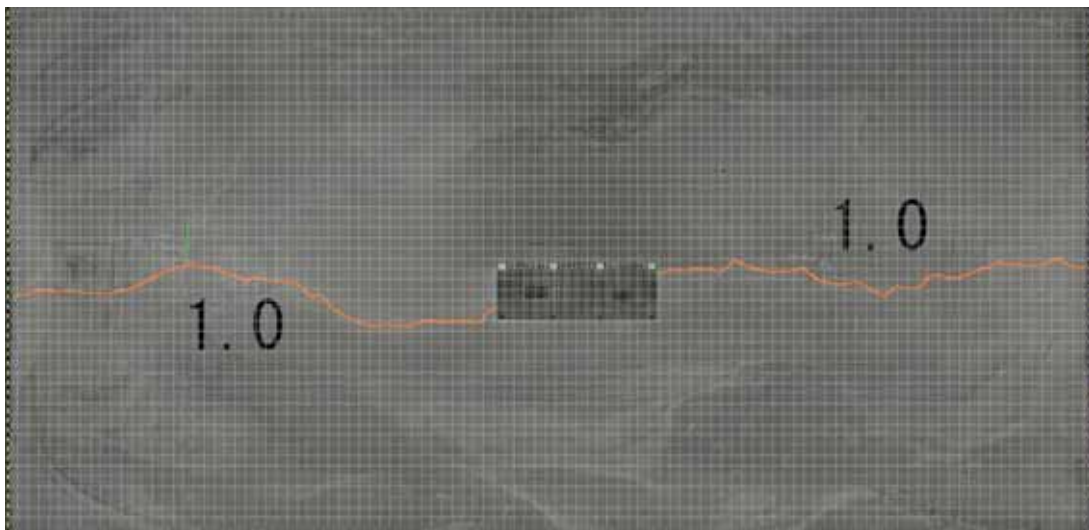


図 4-25 トンネル 1 の正解データ



図 4-26 トンネル 2 の正解データ

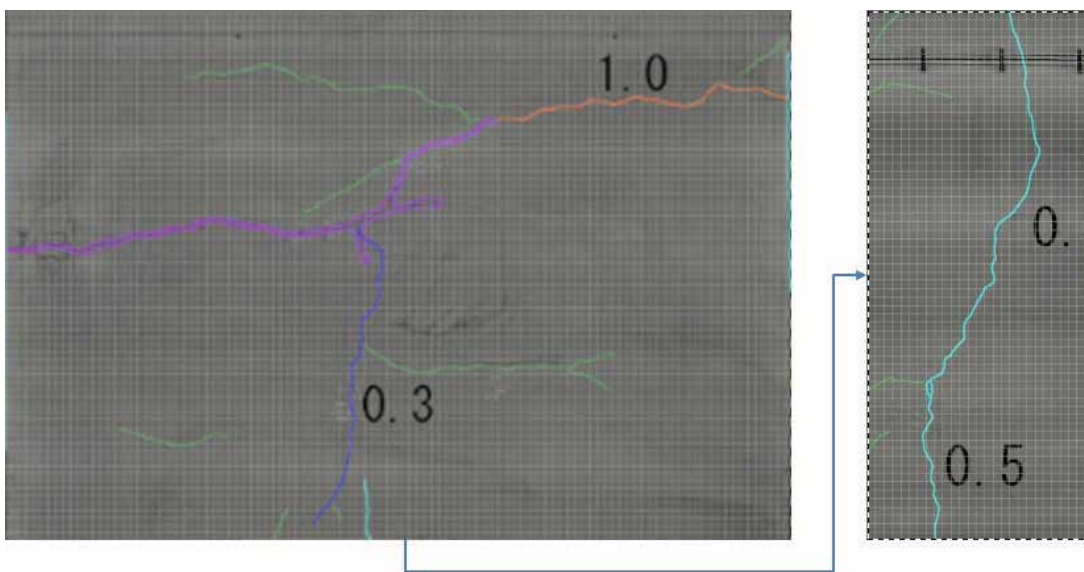
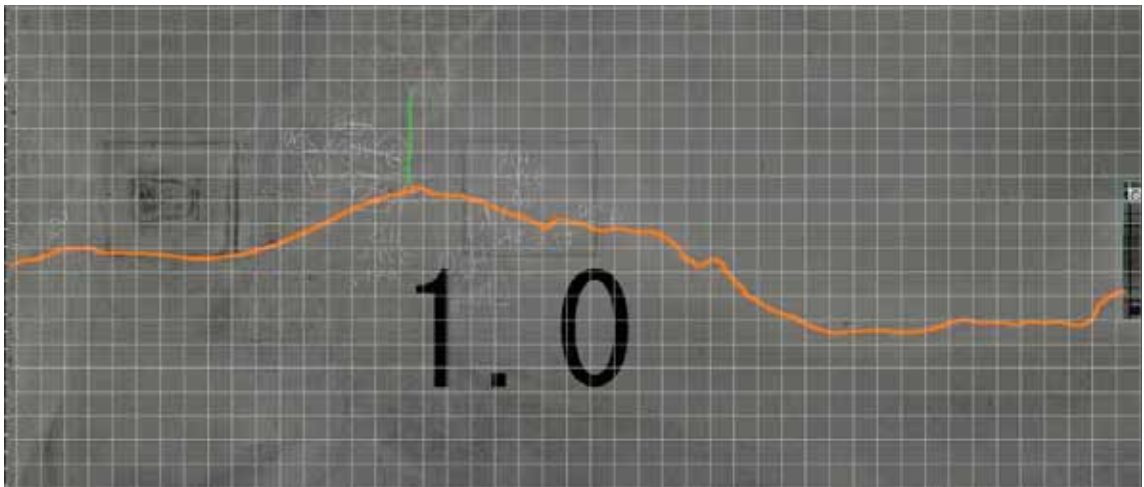


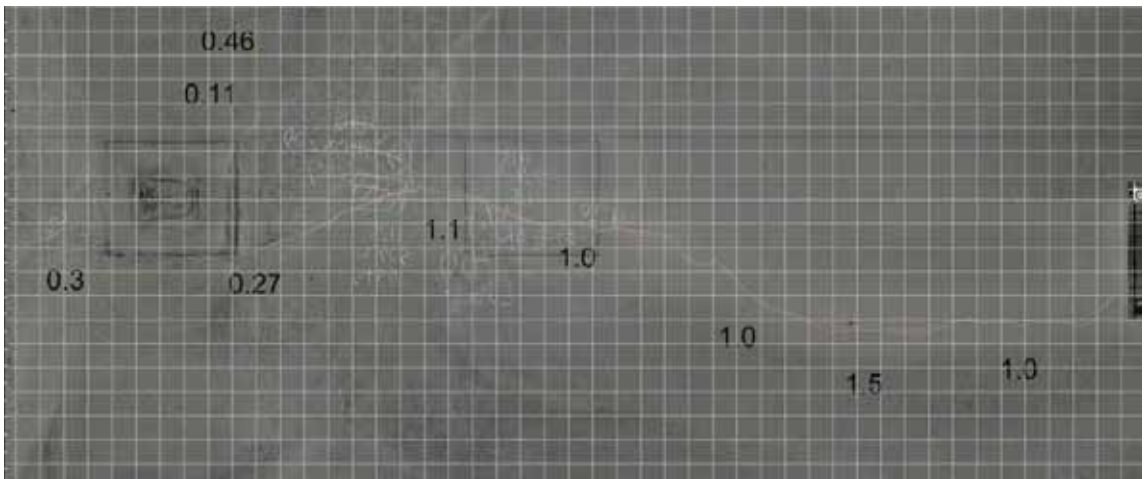
図 4-27 トンネル 3 の正解データ

(3) AI 検出結果

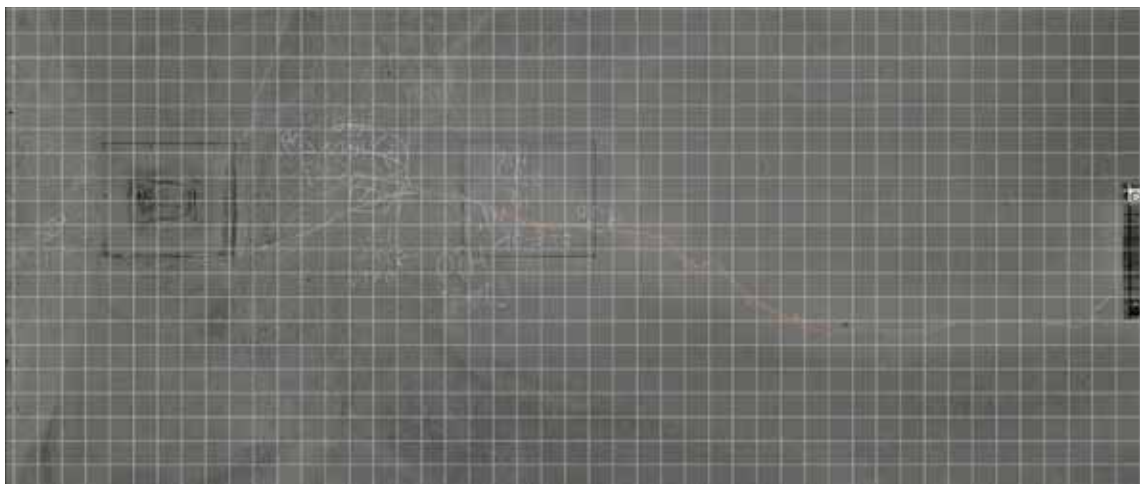
1) トンネル 1



損傷図



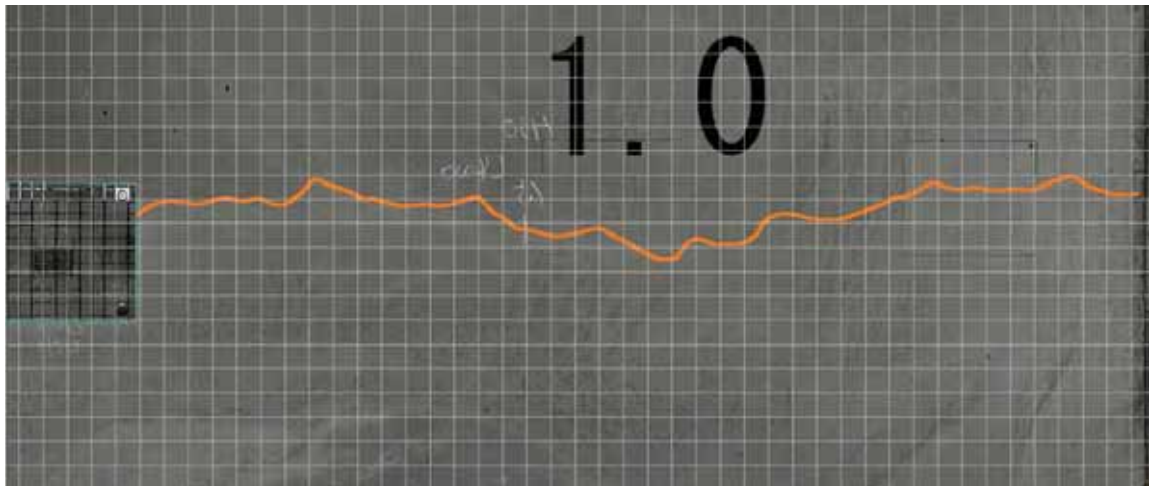
三菱電機 vector 使用



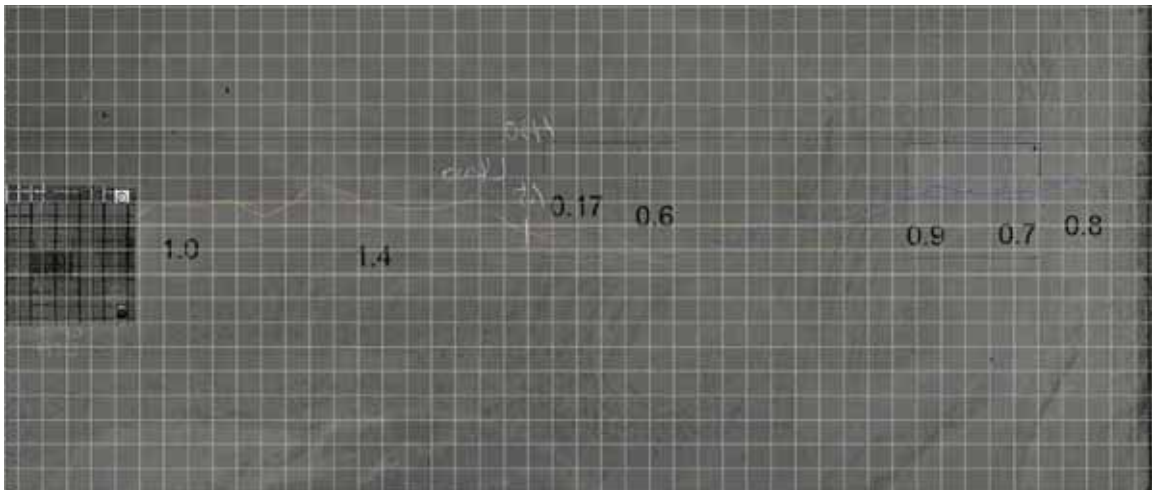
パシフィックコンサルタンツ raster,vector 同じ

図 4-28 トンネル 1 (1)

トンネル1



損傷図



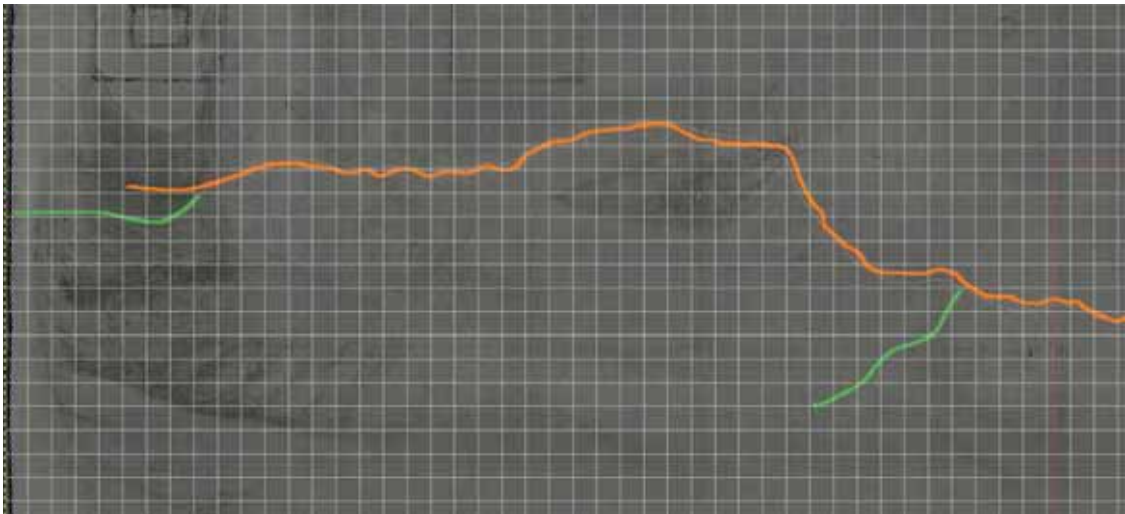
三菱電機 vector 使用



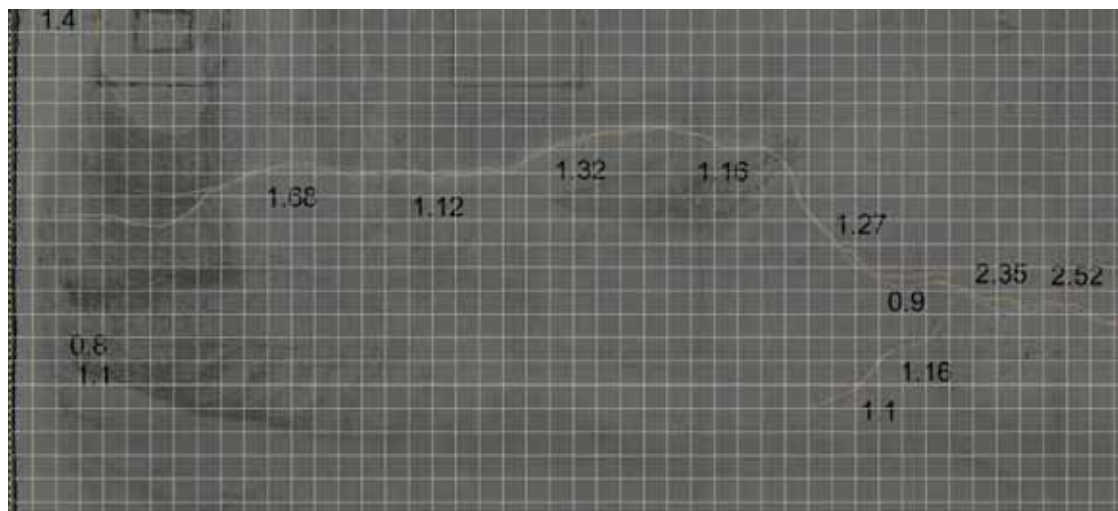
パシフィックコンサルタンツ raster,vector 同じ

図 4-29 トンネル1 (2)

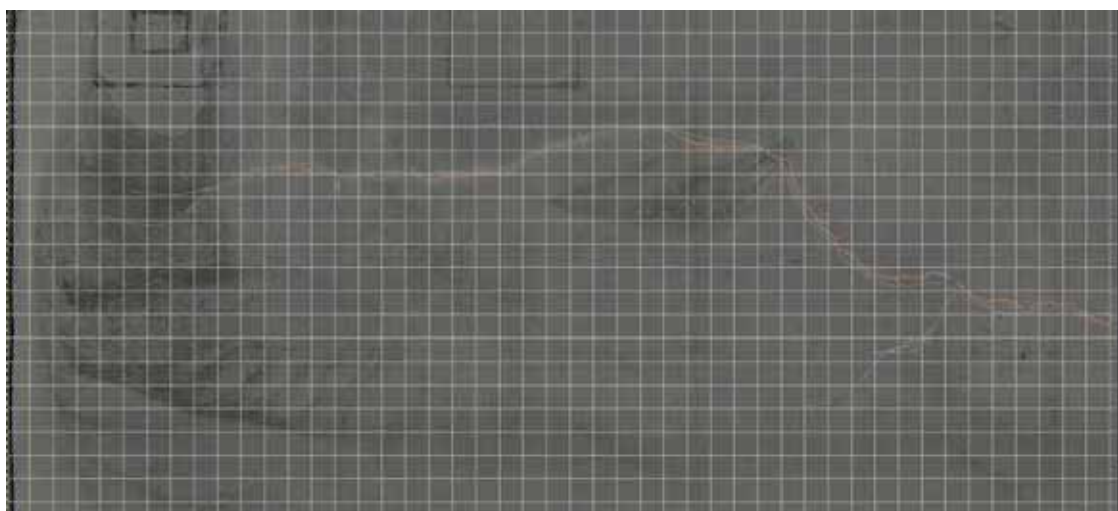
2) トンネル2



損傷図



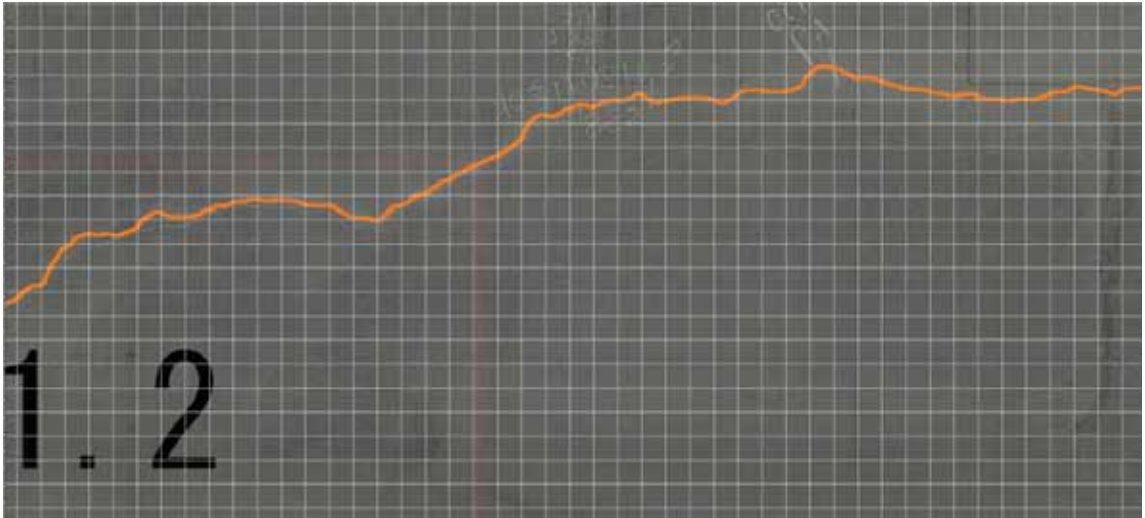
三菱電機 vector 使用



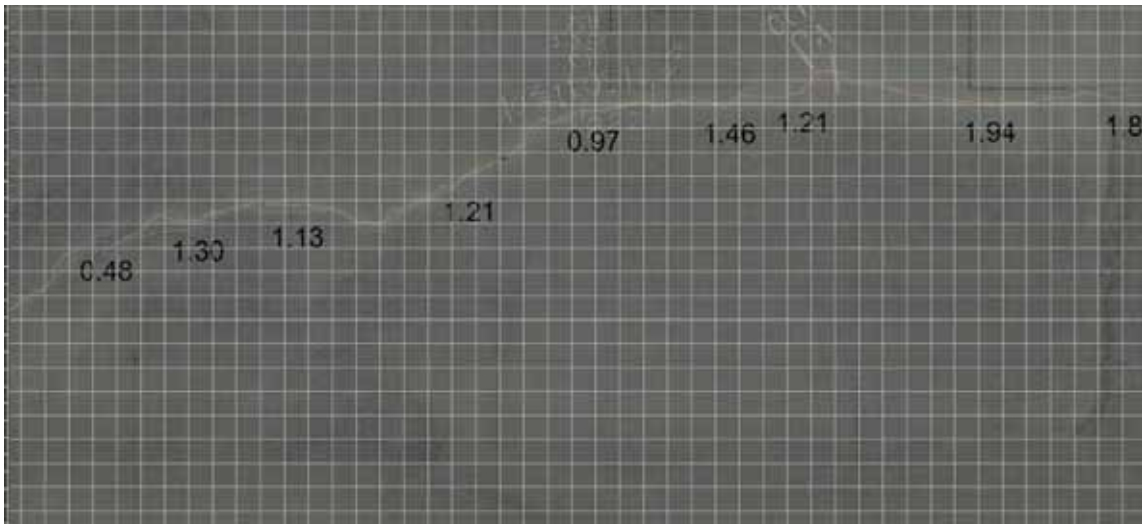
パシフィックコンサルタンツ raster,vector 同じ

図 4-30 トンネル2(1)

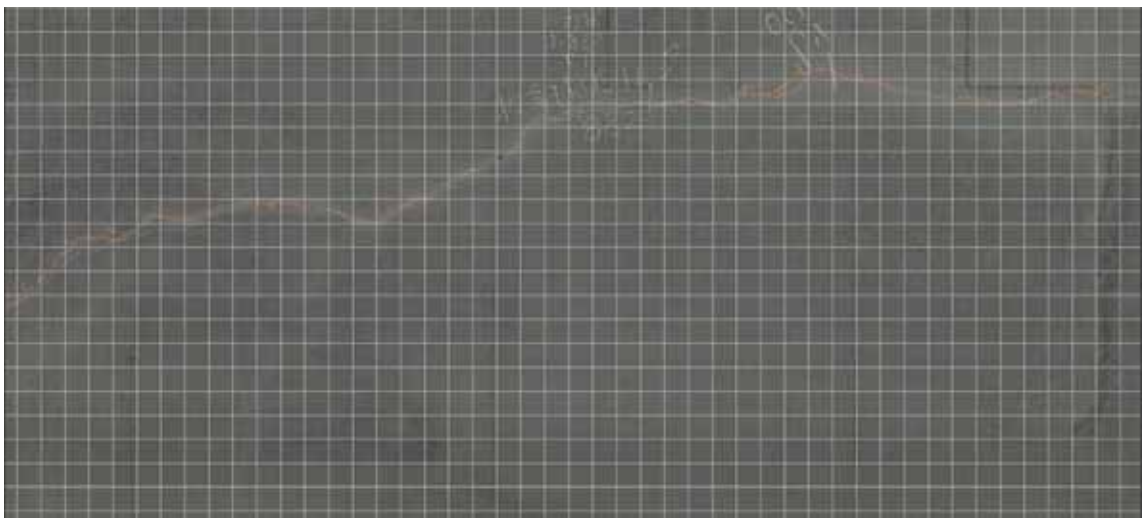
トンネル2



損傷図



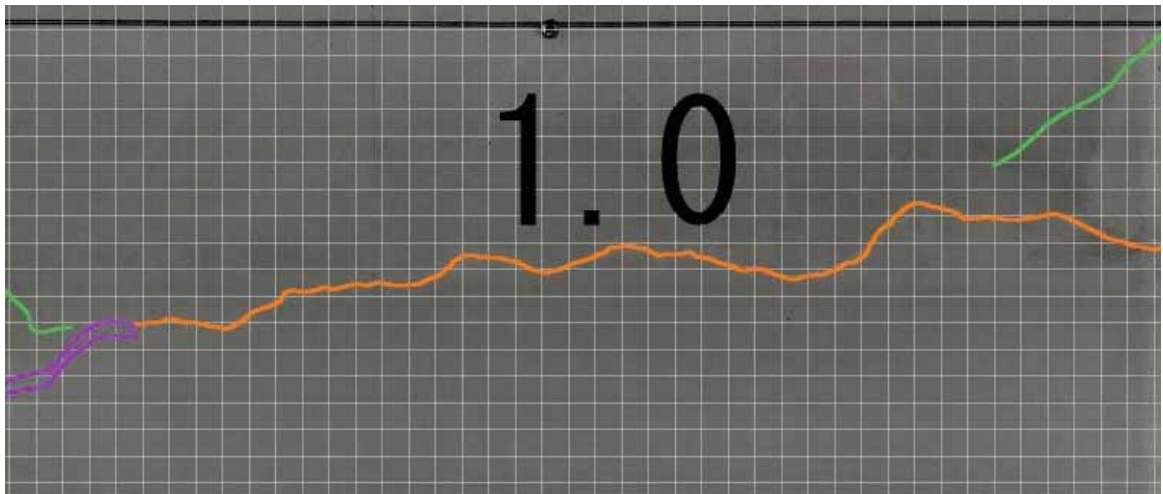
三菱電機 vector 使用



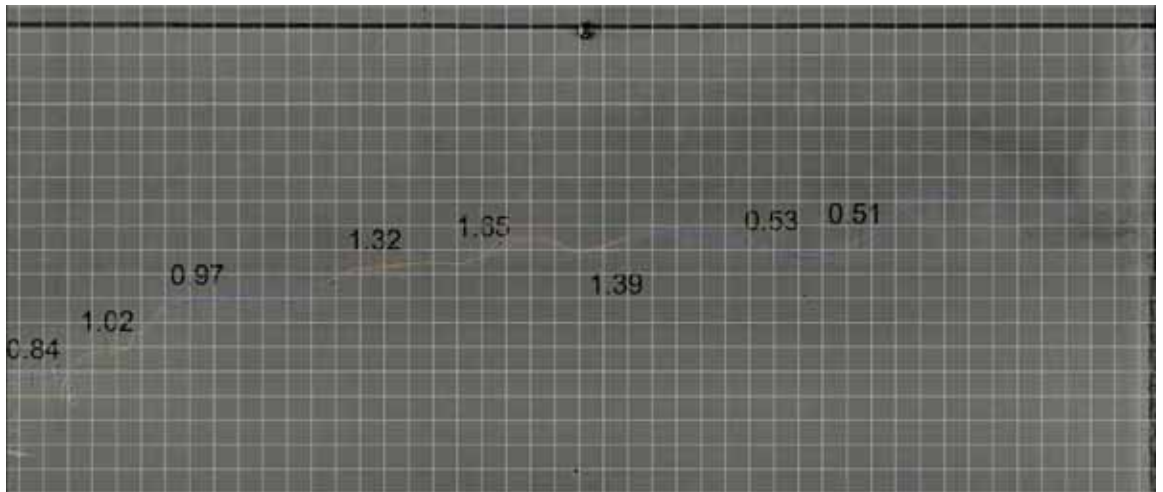
パシフィックコンサルタンツ raster,vector 同じ

図 4-31 トンネル2 (2)

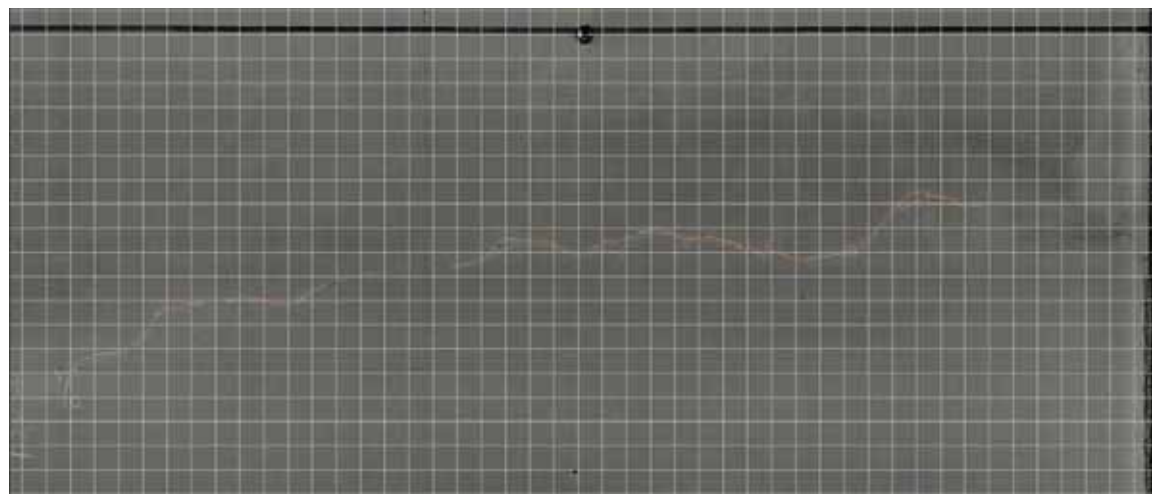
3) トンネル3



損傷図



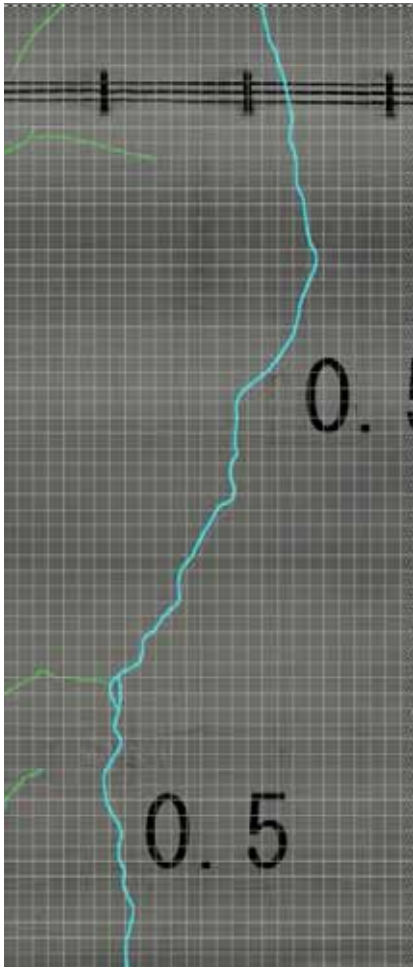
三菱電機 vector 使用



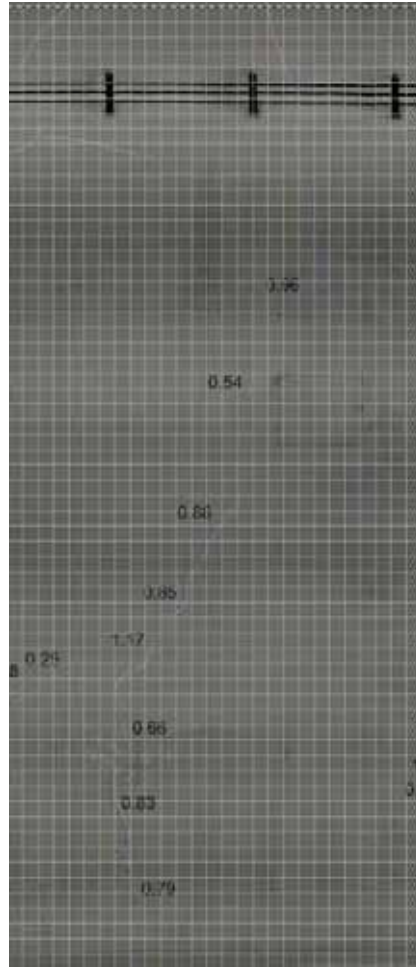
パシフィックコンサルタンツ raster,vector 同じ

図 4-32 トンネル3(1)

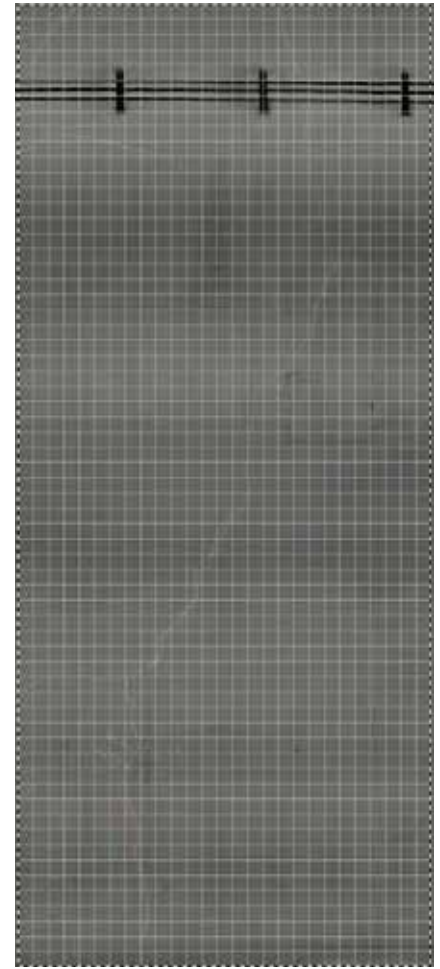
トンネル3



損傷図



三菱電機
vector 使用



パシフィックコンサルタンツ
raster,vector 同じ

図 4-33 トンネル3(2)

(4) 評価結果

1) ブロック単位での評価

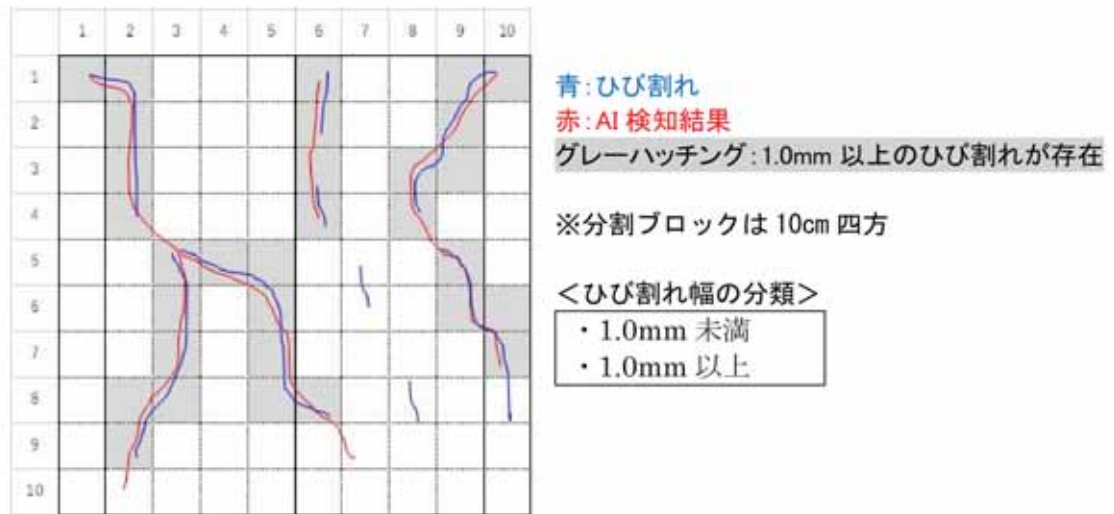
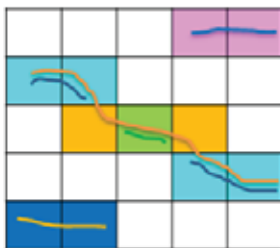


図 4-34 ブロック単位での評価のイメージ (トンネル)

なお、幅の検出区分違いによる評価数値の低下が予想されたため、幅の誤推定について不正解とする場合(Precision_1, Recall_1), 寛容に評価する場合(Precision_2, Recall_2)にて数値を算出した。

- ・ 適合率(Precision) = 正解検出ブロック数 ÷ 全検出ブロック数
- ・ 再現率(Recall) = 正解検出ブロック数 ÷ 全正解ブロック数

ブロック評価凡例



1mm以上ひび割れに対して

- A:TP①:1mm以上正解検出
 - B:TP②:1mm未満検出
 - C:FN:未検出 (画像を技術者が見ても確認できないひび割れは除く)
 - D:FP:誤検出
 - E:画像を技術者が見てもひび割れを識別できない
- 点検結果展開図のひび割れ
 - AI検出した1mm以上ひび割れ
 - AI検出した1mm未満ひび割れ

分割ブロック領域ごとの検知結果評価

$$\begin{aligned} \text{適合率(Precision}_1\text{)} &= A / (A + B + D) \\ \text{(Precision}_2\text{)} &= (A + B) / (A + B + D) \\ \text{再現率(Recall}_1\text{)} &= A / (A + B + C) \\ \text{(Recall}_2\text{)} &= (A + B) / (A + B + C) \end{aligned}$$

図 4-35 評価結果の算出方法 (トンネル)

評価結果を図 4-37～図 4-39 に示す。

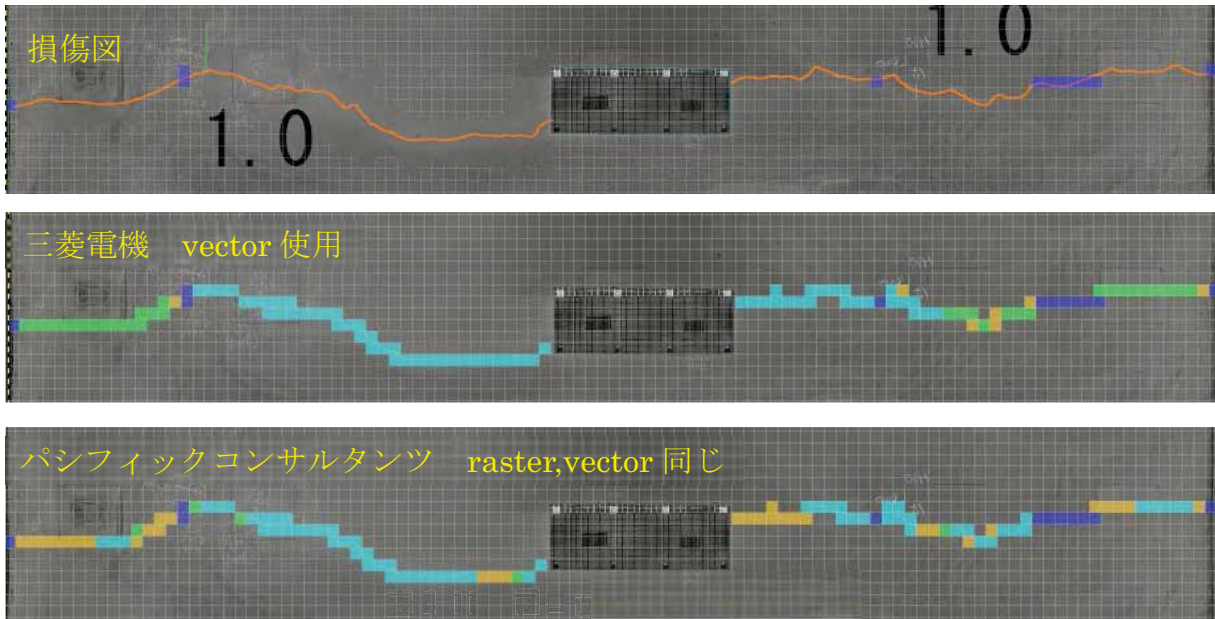


図 4-36 トンネル1

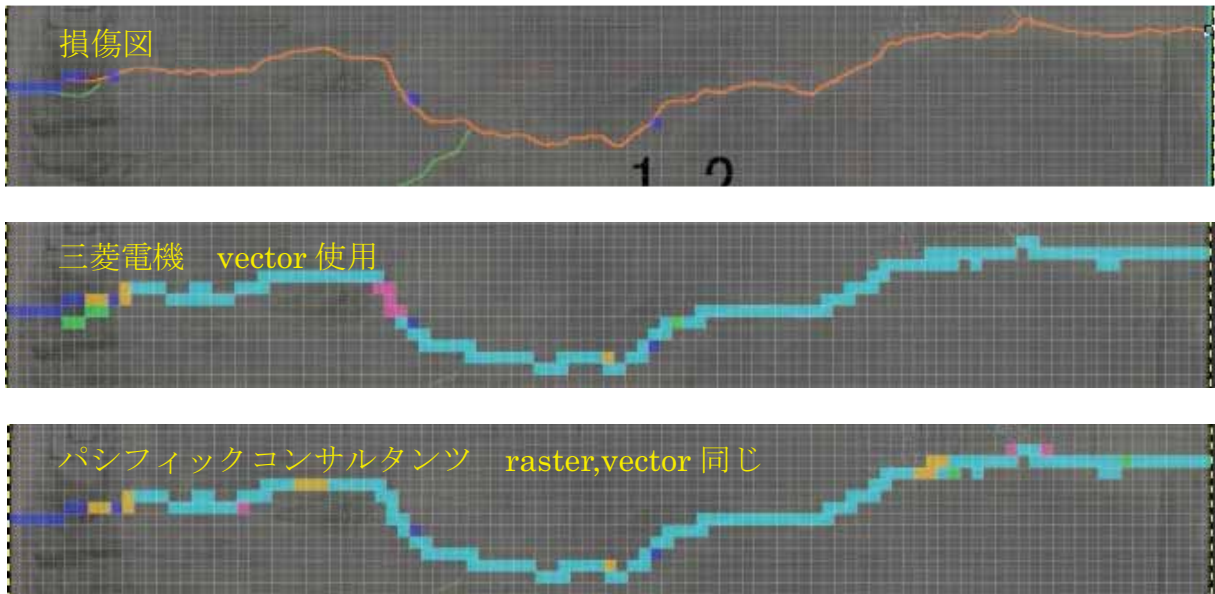


図 4-37 トンネル2

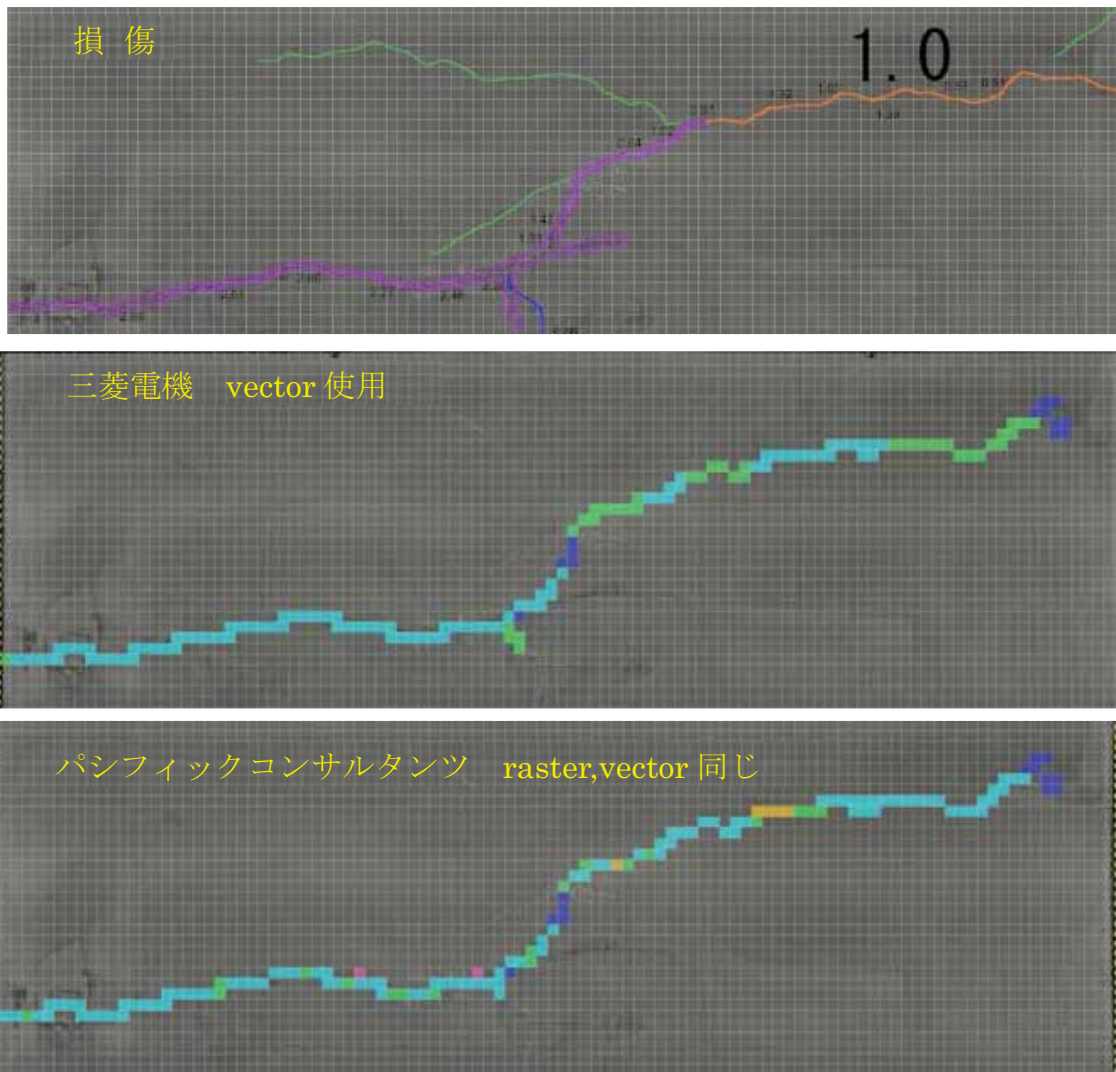


図 4-38 トンネル3

表 4-7 ブロック単位での評価結果

トンネル1

	A	B	C	D	E	Precision_1	Precision_2	Recall_1	Recall_2
三菱電機	60	31	7	0	11	65.9%	100.0%	61.2%	92.9%
PCKK	61	5	32	0	11	92.4%	100.0%	62.2%	67.3%

トンネル2

	A	B	C	D	E	Precision_1	Precision_2	Recall_1	Recall_2
三菱電機	112	5	5	5	10	91.8%	95.9%	91.8%	95.9%
PCKK	109	2	12	3	10	95.6%	97.4%	88.6%	90.2%

トンネル3

	A	B	C	D	E	Precision_1	Precision_2	Recall_1	Recall_2
三菱電機	86	37	0	0	13	69.9%	100.0%	69.9%	100.0%
PCKK	98	18	4	2	13	83.1%	98.3%	81.7%	96.7%

評価結果を表 4-9 に示す。結果、両社とも幅の誤推定を正解とした場合(Precision_2, Recall_2)において、評価数値が大幅に向上する結果となり、幅の推定誤差が与える影響が非常に大きいことが確認された。正解データのひびわれ幅については、技術者による入念な相互チェックと現地確認を行っているものの、幅の算出は基本的には目視によるものであるため、必ず誤差は存在するものと考えられる。このため、幅の区分が細かくなればなるほど、評価数値に与える影響が大きくなる。

今回は評価基準値としてひびわれ幅 1.0mm としたが、点検要領にて示される監視が必要とされるひびわれ幅 3.0mm を基準値とした場合、評価数値は向上するものと考えられる。

なお、三菱電機については今回の評価試行における趣旨を若干取り違えた部分があり、解析結果については、Raster データから Vector データへの変換時に技術者判断により誤検出等を修正した箇所があった。このため、参考に修正前の Raster データにおいても評価数値の算出を行った。

結果を表 4-10 に示す。

表 4-8 Vector データと Raster データの比較（三菱電機）

トンネル1

	A	B	C	D	E	Precision_1	Precision_2	Recall_1	Recall_2
三菱電機 (Vector)	60	31	7	0	11	65.9%	100.0%	61.2%	92.9%
三菱電機 (Raster)	60	29	7	46	11	44.4%	65.9%	62.5%	92.7%

トンネル2

	A	B	C	D	E	Precision_1	Precision_2	Recall_1	Recall_2
三菱電機 (Vector)	112	5	5	5	10	91.8%	95.9%	91.8%	95.9%
三菱電機 (Raster)	109	7	1	42	10	69.0%	73.4%	93.2%	99.1%

トンネル3

	A	B	C	D	E	Precision_1	Precision_2	Recall_1	Recall_2
三菱電機 (Vector)	86	37	0	0	13	69.9%	100.0%	69.9%	100.0%
三菱電機 (Raster)	86	36	0	65	13	46.0%	65.2%	70.5%	100.0%

なお、パシフィックコンサルタンツ及び三菱電機については、共に自社の点検支援技術を保有し、トンネル点検業務を行っている。

写真撮影技術については、パシフィックコンサルタンツの MIMM-R はデジタルビデオカメラを使用し、変状抽出 AI の開発には 1.5mm/画素の教師データを基本として使用している。一方で、三菱電機の MMSD II は 4K ラインカメラを使用して高精細な画像を撮影することを特徴としており、通常 0.5mm/画素程度で撮影を行っている。

トンネル教師データ，及び今回の評価試行で提供した評価データは 1.5mm/画素の画像であることから，画像解像度の違いが AI 解析結果にも影響を及ぼしている可能性は否定できないため，評価の公平性という意味で今後，議論が必要と思われる。

2) 技術者の判断による評価

点検技術者の視点により，AI 検知性能の評価を下記の 2 手法により行った。

【ひびわれ検知性能評価】

検知結果と正解データを技術者が見比べて検知できていると判断できるか評価する。(1本のひびわれが分断されている，結果がずれている，部分的に検知できていない等でも技術者の判断で検知有無を判定)

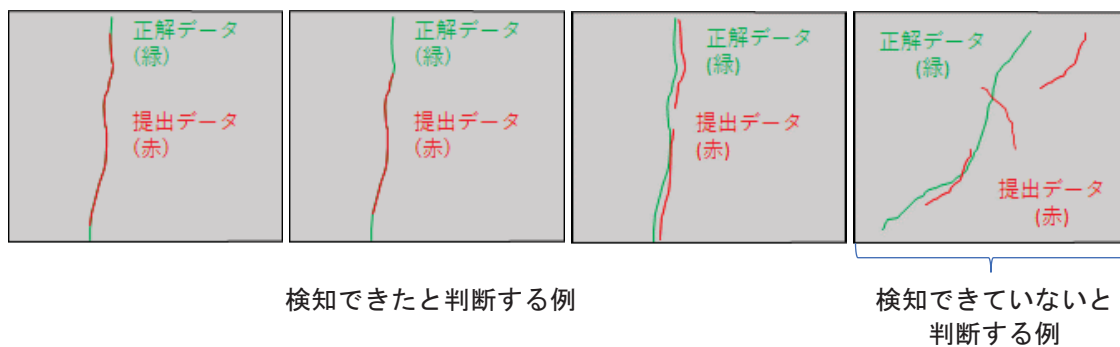


図 4-39 ひびわれ検知の評価例

- ・ 適合率 (Precision) = 正解検出ひびわれ数 ÷ 全検出ひびわれ数
- ・ 再現率 (Recall) = 正解検出ひびわれ数 ÷ 全正解ひびわれ数

【ひびわれ幅の算出性能評価】

各ひびわれの最大ひびわれ幅が検知できているか否かを評価する。なお，ひびわれについては以下の通り分類し，それぞれの分類で検知できているかについて技術者が目視で判断する。

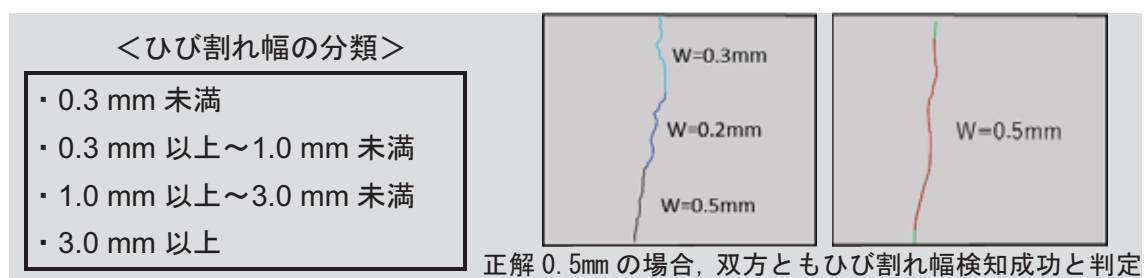


図 4-40 ひびわれ幅の分類と評価例

なお、評価にあたっては、技術者による定性的評価として、以下の追加評価と連続性を考慮した。

評価：A, B, C, D の4段階

連続性： α , β , γ の3区分

また、ひびわれの本数にて評価数値(Precision, Recall)を算出した。1本のひびわれの定義としては、「ブロック評価で技術者が見ても画像からひびわれが認められないブロック」でひびわれが分断されているものとしてひびわれ本数をカウントした。

なお、評価対象として、天端縦断方向の1.0mm以上のひびわれをピックアップした。

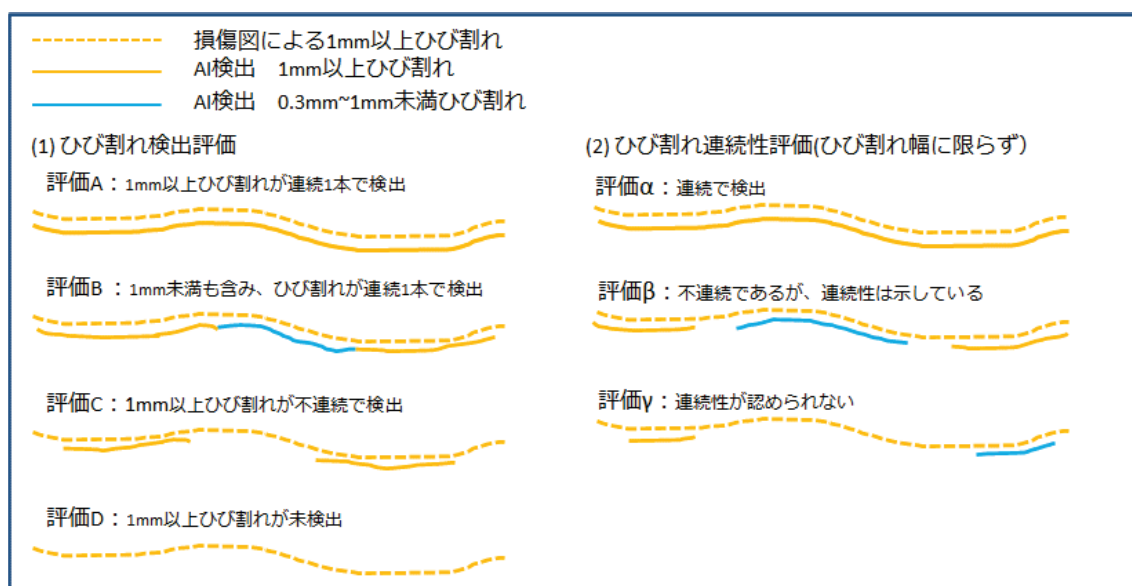


図 4-41 評価対象のひびわれ検知可否の評価

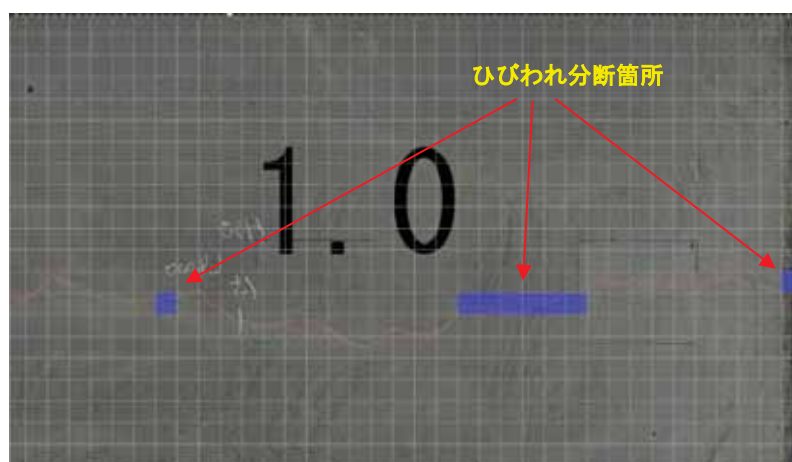


図 4-42 ひびわれ本数の数え方

A) ひびわれ検知性能評価

検出結果を図 4-44～図 4-46, 評価結果を表 4-11 に示す.

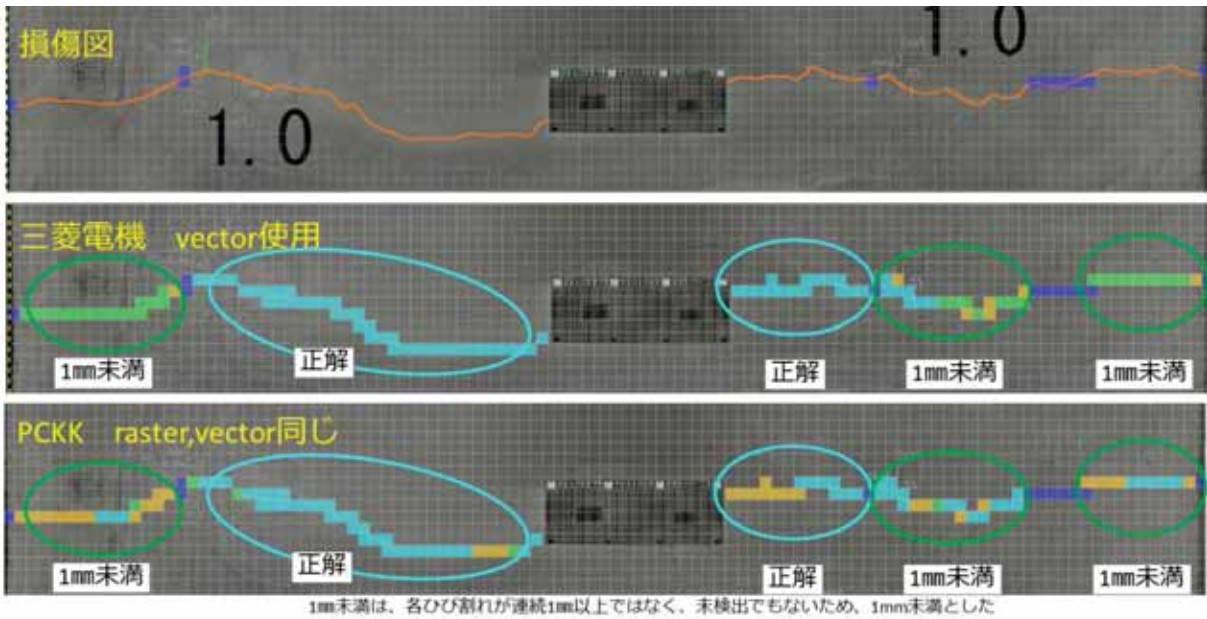


図 4-43 ひび割れ検知性能 トンネル1

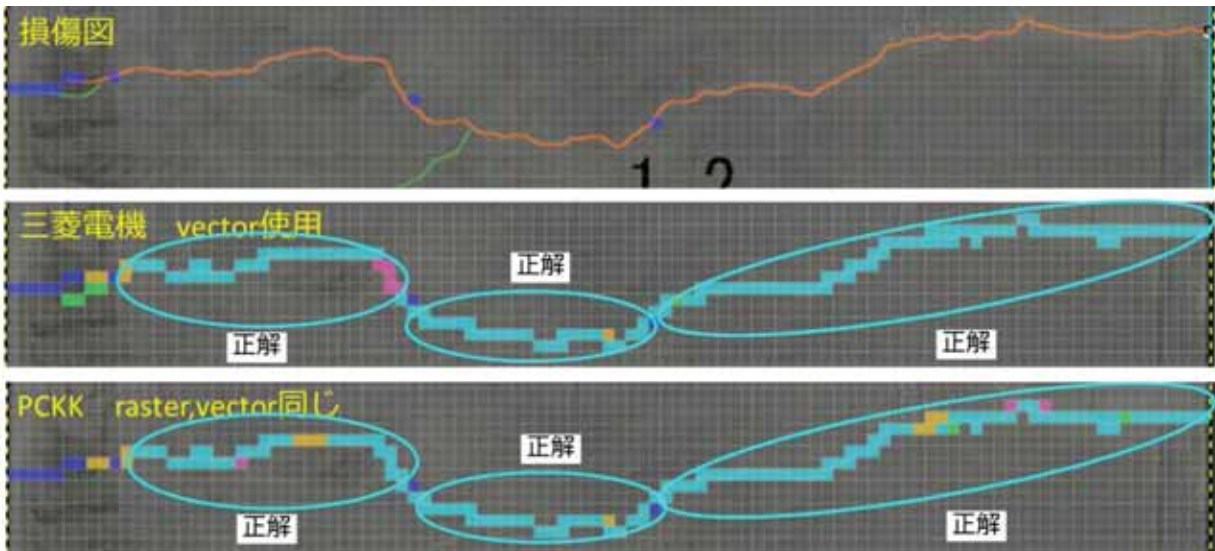


図 4-44 ひび割れ検知性能 トンネル2

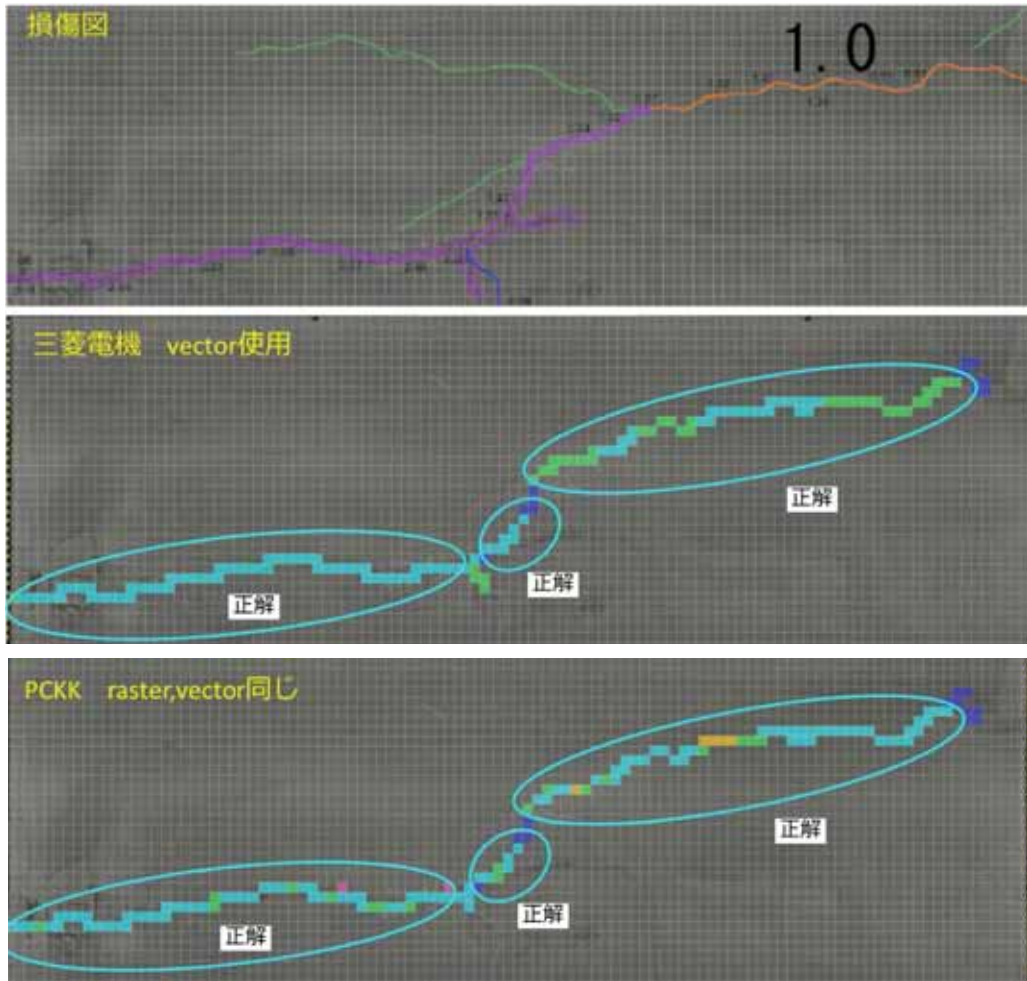


図 4-45 ひび割れ検知性能 トンネル3

表 4-9 ひびわれ検知性能の評価

トンネル 1	ひび割れ 1本とし ての評価	技術者が見ても画像からひび割れを判別できない箇所を分断ひび割れとみたひび割れ評価 複数ひび割れとしての評価								
		ひび割れ数	正解検出	1mm未満 検出	未検出	誤検出	Precision_1	Precision_2	Recall_1	Recall_2
三菱電機	B-α	5	2	3	0	0	40.0%	100.0%	40.0%	100.0%
PCKK	C-β	5	2	3	0	0	40.0%	100.0%	40.0%	100.0%

トンネル 2	ひび割れ 1本とし ての評価	技術者が見ても画像からひび割れを判別できない箇所を分断ひび割れとみたひび割れ評価 複数ひび割れとしての評価								
		ひび割れ数	正解検出	1mm未満 検出	未検出	誤検出	Precision_1	Precision_2	Recall_1	Recall_2
三菱電機	B-α	3	3	0	0	0	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
PCKK	B-α	3	3	0	0	0	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

トンネル 3	ひび割れ 1本とし ての評価	技術者が見ても画像からひび割れを判別できない箇所を分断ひび割れとみたひび割れ評価 複数ひび割れとしての評価								
		ひび割れ数	正解検出	1mm未満 検出	未検出	誤検出	Precision_1	Precision_2	Recall_1	Recall_2
三菱電機	B-α	3	3	0	0	0	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
PCKK	B-α	3	3	0	0	0	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

B) ひび割れ幅算出性能

検出結果を図 4-47～図 4-49, 評価結果を表 4-12 に示す.

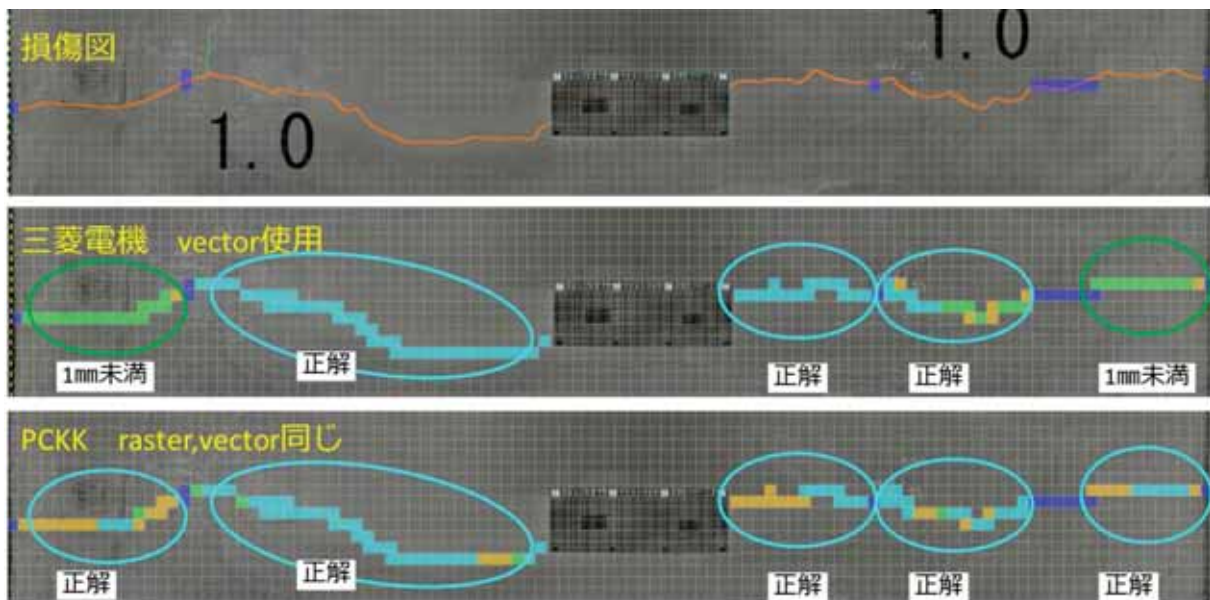


図 4-46 ひび割れ幅算出性能 トンネル1

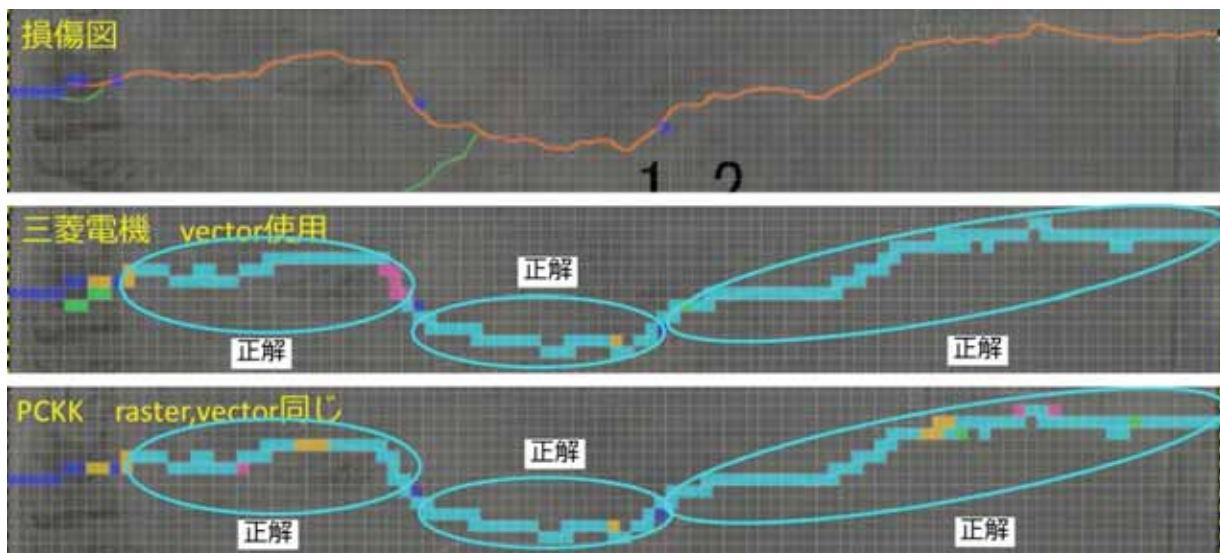


図 4-47 ひび割れ幅算出性能 トンネル2

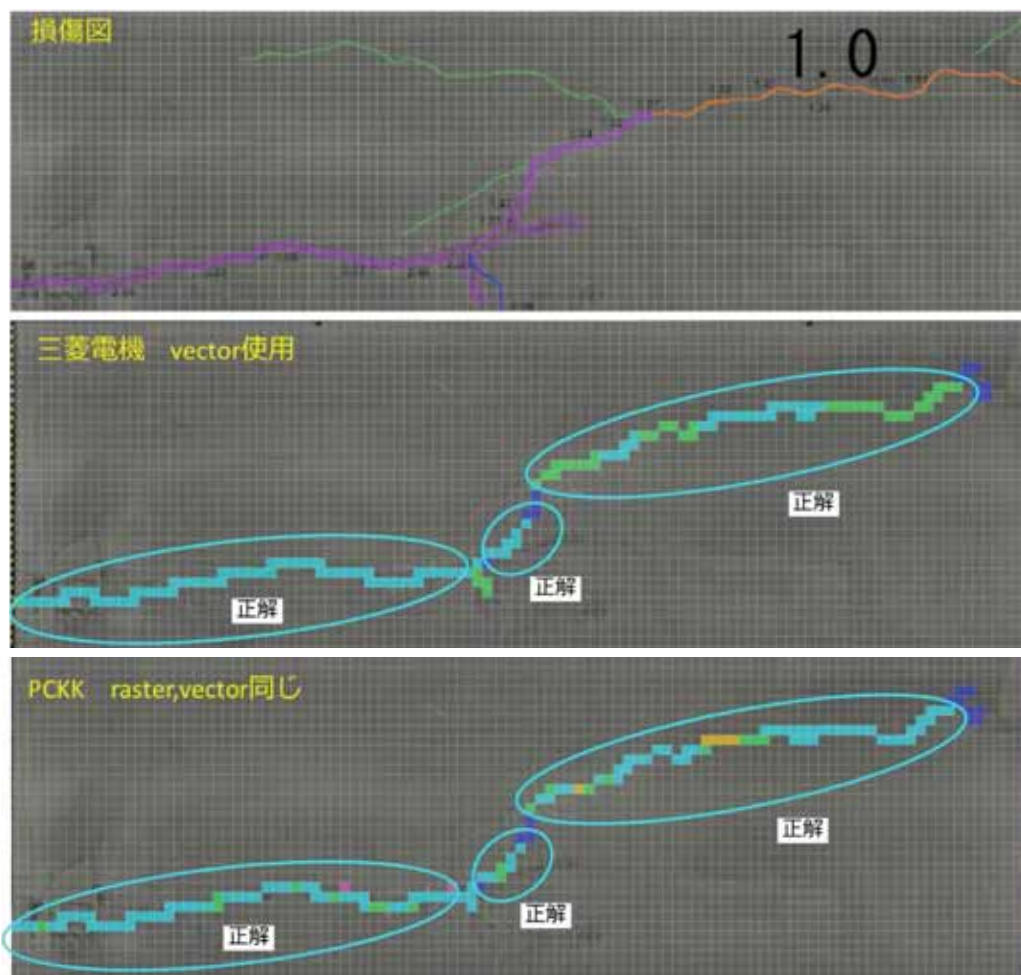


図 4-48 ひび割れ幅算出性能 トンネル3

表 4-10 ひびわれ幅算出性能の評価

トンネル 1	ひび割れ 1本とし ての評価	技術者が見ても画像からひび割れを判別できない箇所を分断ひび割れとみたひび割れ評価 複数ひび割れとしての評価								
		ひび割れ数	正解検出 最大幅1mm	最大幅1mm 未満	未検出	誤検出	Precision_1	Precision_2	Recall_1	Recall_2
三菱電機	B-α	5	3	2	0	0	60.0%	100.0%	60.0%	100.0%
PCKK	C-β	5	5	0	0	0	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

トンネル 2	ひび割れ 1本とし ての評価	技術者が見ても画像からひび割れを判別できない箇所を分断ひび割れとみたひび割れ評価 複数ひび割れとしての評価								
		ひび割れ数	正解検出 最大幅1mm	最大幅1mm 未満	未検出	誤検出	Precision_1	Precision_2	Recall_1	Recall_2
三菱電機	B-α	3	3	0	0	0	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
PCKK	B-α	3	3	0	0	0	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

トンネル 3	ひび割れ 1本とし ての評価	技術者が見ても画像からひび割れを判別できない箇所を分断ひび割れとみたひび割れ評価 複数ひび割れとしての評価								
		ひび割れ数	正解検出 最大幅1mm	最大幅1mm 未満	未検出	誤検出	Precision_1	Precision_2	Recall_1	Recall_2
三菱電機	B-α	3	3	0	0	0	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
PCKK	B-α	3	3	0	0	0	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

3) まとめ

①評価法 1-(1) 評価対象の「ひびわれ」検知可否の評価について

- ・技術者による評価である「評価対象のひびわれ検知可否の評価(天端縦断方向 1mm 以上ひびわれの評価)」について、両社ともほぼ良好な結果となっている。
- ・今回の評価では、ひびわれ検出評価 A~D、連続性評価 α~γ の指標を使い評価を実施した。結果は、ひびわれ検出について、評価 B(1mm 未満も含み、ひびわれが連続 1 本で検出)あるいは評価 C(1mm 以上ひびわれが不連続で検出)のいずれかであり、良好な結果と言える。連続性については、概ね評価 α(連続で検出)であったが、一部に β もあった。AI による連続的検出は、AI 性能の他に、画像性能、チョーク・遊離石灰による不可視などの問題と合わせ、今後の課題となる。
- ・トンネルにおける 1mm 以上のひびわれは、外力性あるいは乾燥収縮により発生することが多く、トンネルスパン全体に入ることが一般的である。その意味では、ひびわれを 1 本として検出する場合、完全に連続したひびわれとして評価することになるが、実際にはひびわれ全てが 1mm 以上になるとは限らず、また画像では技術者が判断しても連続と見極められない場合も想定される。今回の評価では、技術者が見ても連続していると判断できない箇所を非連続として分断して評価した。このひびわれ分断箇所について、技術者による差異が生じる可能性があり、適切な評価と言えるかが課題で残る。
- ・分断したひびわれごとの評価について、概ね 1mm 以上であれば正解とし、検出できていない場合は未検出とし、これらの評価は技術者ごとに判断が分かれることはない。一方

で、一部が 1mm 以上の場合、ひびわれの特性上 1mm(最大幅 1mm)と評価できる場合は、1mm として正解にできるが、誤検出、未検出が含まれ連続ひびわれと判断できない場合は、未検出とせざるを得ない場合も見受けられた。また、分断したひびわれ全体が 1mm 未満として検出していた場合、評価法上は 1mm 未満の分類となるため、Precision_1 が低下している。1mm 未満も正解として評価すれば、Precision_2 は 100%となっている。実務上は、展開図作成において最大幅で表示するため、Precision_2 の評価で問題なく、評価法の課題であると考ええる。

- ・今回の評価では、実務での活用を想定し、1mm 以上のひびわれが適切に検出できるかに着目して評価した。1mm 未満については、ひびわれについては検出できているものがあったが、①1mm 以上と過大に検出したものがある、②ひびわれ以外を検出したものがある、③遊離石灰、チョークなどと重なったり、並走するひびわれは適正に検出できていないものがある、などの課題が見受けられる。

点検要領上は、①はひびわれを見逃したわけではないので問題ない、②は AI 性能の課題、③は AI に限らず画像を活用する上での課題であり人が行う点検でも漏水や遊離石灰で視認できないものは AI でも検出できないのはやむを得ないと考えられる。

- ・ひびわれの有無を検討する場合、上記の 1mm 未満のひびわれをどのように評価するかは、次段階の課題である。点検要領上は矢板工法で外力性変状の場合、3mm, 5mm 以上が判断基準になる。実務では、1mm 程度以上の場合、監視を促す目的から II_bとするケースも見られるため、今回は 1mm 以上での評価を行っている。一方で、剥離に繋がるブロック状、交差、目地・ひびわれ沿いの縞状のひびわれや、進行性、新規のひびわれなどは、ひびわれが何 mm として評価しなくても、ひびわれの存在が画像から確認できることが望ましい。そのような観点から AI 性能を評価する検討が次の課題になると思われる。

②評価法 1-(2) 評価対象の「ひびわれ幅」検知可否の評価について

- ・技術者による評価である「評価対象のひびわれ幅検知可否の評価(天端縦断方向 1mm 以上ひびわれの評価)」について、両社ともほぼ良好な結果となっている。
- ・今回の評価では、ひびわれ検出評価 A~D、連続性評価 $\alpha \sim \gamma$ の指標を使い評価を実施した。結果は、ひびわれ幅検出について、評価 B(1mm 未満も含み、ひびわれが連続 1 本で検出)あるいは評価 C(1mm 以上ひびわれが不連続で検出)のいずれかであり、比較的良好な結果と言える。連続性については、概ね評価 α (連続で検出)であったが、一部に β , γ もあった。AI による連続的検出は、幅の検出評価についても AI 性能の他に、画像性能、チョーク・遊離石灰による不可視などの問題と合わせ、今後の課題となる。
- ・ひびわれの連続性、ひびわれ不可視の問題、1mm 未満ひびわれの検出などは、ひびわれ検出の可否の評価と同様に、今後の課題となる。

③評価法 2 分割ブロック領域毎のひびわれ検知評価(見逃してはいけない損傷の検知評価)について

- ・「分割ブロック領域毎のひびわれ検知評価(見逃してはいけない損傷の検知評価)について、両社ともほぼ良好な結果となっている。
- ・三菱電機について、Raster データについてはひびわれ幅が検出されていないため、評価は Vector を使っている。Vector については、技術者判断を追加しているとのヒアリング結果であったため、Raster データによる評価を追加検証したところ、誤検出が認められるため、Precision が低下する結果となっている。
- ・AI 評価の課題として、AI のみによる評価か、技術者判断を加えるかについて、今後の課題となる。
- ・技術者の判断でブロック評価を考察すると、1mm 未満のひびわれも加えた Precision_2, Recall_2 による評価で良いと考えられ、今期の結果は良好な結果であると思われる。

4.1.5 評価結果の総括と今後に向けて

今回、AI 評価を試行的に行い、AI の評価方法については、「技術者による評価」と「ブロック分割単位」での評価の 2 種類を実施した。

今後も、インフラ点検における AI 開発の促進を図る上で、継続的に AI 評価を行っていく必要がある、そのためには評価方法の更なるスパイラルアップが必要である。

今後に向けた総括は以下のとおりである。

- ① 今回のひびわれ抽出を対象にした AI 評価結果について、今後を活用できる方向性が見いだせたと思われる。
- ② 今回の評価法については、点検・診断にいかに関与するかという観点の前に、第一段階として「ひびわれがいかに関与できるか」という評価であったため、技術者判断という面から評価法に課題が残る点もやむを得ないと思われる。
- ③ 今後の評価やルールを考える上では、AI に求める目的、そのために求められる性能や機能を定義(整理)した上で、点検技術者にとって有益な性能・機能という観点から評価するなど、診断にいかに関与するかという観点から、AI の開発を促進させるための評価法を議論するのが良いと思われる。
- ④ AI のロジックを評価する方法と、点検・診断に関与する視点に立った評価法という 2 方向の整理が必要になるとと思われる。

4.2 診断支援手法

4.2.1 診断 AI の活用

(1) 概要

国土交通省の性能カタログにおいて、定期点検における新技術活用の方向性が図 4-50 のとおり示されている⁵⁾。支援技術は、主として状態の把握と健全性の診断に活用される。前節までに示した AI 手法は、点検 AI を主目的としており、状態把握のための情報を提供する目的に使用されている。ここで、診断 AI とは、健全性の診断に活用する AI を意味し、診断の定量化を支援するものである。

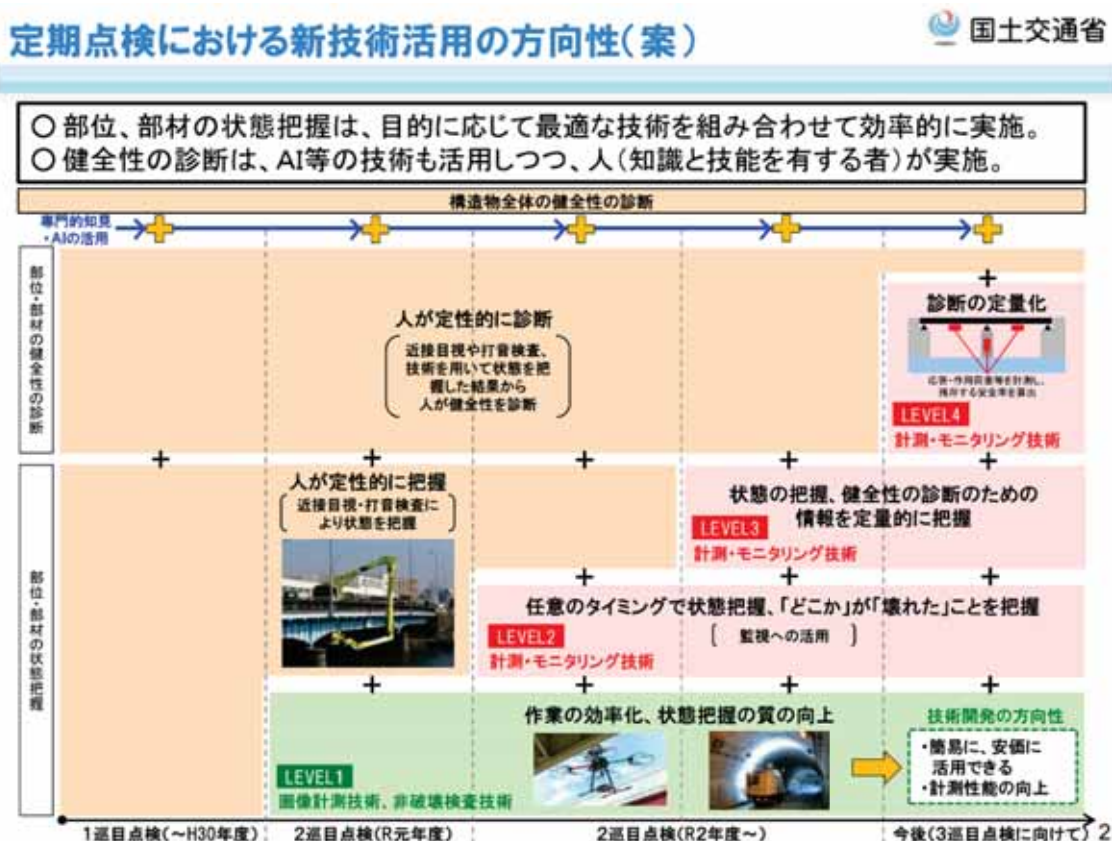


図 4-49 性能カタログ 新技術活用の方向性⁵⁾

道路トンネル定期点検要領⁴⁾に示されている健全性の診断は、表 4-13 のとおり、①圧ざ、ひび割れ、②うき・はく離、③変形、移動、沈下など 6 項目の変状種類に対して判定を行うものであり、変状区分として、外力、材質劣化、漏水の 3 区分のいずれに相当するかを識別することが最も重要である。

覆工面に発生するひび割れが、外力性の圧ざ、ひび割れか、材質劣化かに区分されるかを判定するための外力性要因の判定支援を行う AI は、4.2.2 に記述することとし、ここではひび割れの判定支援を行う AI について述べる。

外力性要因の場合の矢板工法の場合の判定の考え方は、点検要領によれば、表 4-14 のとおり示されている。山岳トンネル工法の場合は、表 4-15 のとおりである。

表 4-13 変状種類及び変状区分との関係⁴⁾

表-解 7.1 変状種類及び変状区分との関係

変状種類	変状区分		
	外力	材質劣化	漏水
①圧ざ、ひび割れ	○	○	
②うき・はく離	○	○	
③変形、移動、沈下	○		
④鋼材腐食		○	
⑤巻厚の不足または減少、背面空洞		○	
⑥漏水等による変状			○

補足1) 変状種類は変状として現れる事象であり、変状区分は基本的には変状の要因を区分したものである。したがって、ここでの変状区分は、必要となる対策の区分とは異なることに注意する必要がある。例えば、材質劣化による巻厚不足や減少が生じている場合にも、必要に応じて外力への対策が必要となるなど。

補足2) 変状区分とは、変状現象の要因を3つに区分(外力、材質劣化、漏水)したものをいう。

- ・ 外力とは、トンネルの外部から作用する力であり、緩み土圧、偏土圧、地すべりによる土圧、膨張性土圧、水圧、凍上圧等の総称をいう。
- ・ 材質劣化とは、使用材料の品質や性能が低下するものであり、コンクリートの中性化、アルカリ骨材反応、鋼材の腐食、凍害、塩害、温度収縮、乾燥収縮等の総称をいう。なお、施工に起因する不具合もこれに含む。
- ・ 漏水とは、覆工背面地山等からの水が、トンネル坑内に流出することであり、覆工や路面の目地部、ひび割れ箇所等の水流出の総称をいう。なお、漏水等による変状には、冬期におけるつらや側氷が生じる場合も含む。

表 4-14 ひび割れの判定の目安(矢板工法)⁴⁾

表 8.2.17 点検時(ひび割れの進行の有無が確認できない場合)の判定の目安例(矢板工法)。

対象箇所	部位区分	外力によるひび割れ						対策区分
		幅 ^{mm}			長さ ^m			
覆工	新断面内	3mm以上	3~5mm	3mm未満	10m以上	5~10m	5m未満	I, IIb, IIIa [※]
		○	○	○	○	○	○	
		○	○	○	○	○	○	IIb, IIIa
		○	○	○	○	○	○	III
		○	○	○	○	○	○	IIb, IIIa, III [※]
		○	○	○	○	○	○	IV

判定区分補足

I : 幅 3mm 未満 長さ 5m 未満

II b : 幅 3mm 未満 長さ 5m 以上

III a : 現場の状況に応じて判断する

判定区分補足

II b : ひび割れが軽微で、外力が作用している可能性の低いもの。

II a : 外力の作用の可能性が疑われ、将来的に機能低下が懸念される。

III : 外力の作用の可能性が疑われ、せん断ひび割れ等が確認される。

補足1) 連続したひび割れ内で幅が変化する場合は、最大幅を当該ひび割れの幅とする。
補足2) 覆工スパンをまたがる連続したひび割れは、覆工スパンをまたがって計測される長さを当該ひび割れの長さとする(覆工スパン単位のひび割れ長さは詳細しない)。
補足3) 3mm 未満のひび割れ幅の場合の判定例を下記に示す。
I : 幅3mm未満程度で、外力は材質劣化の要因と推定される。
II a : 地山条件等、両方のひび割れ発生状況等から、外力の作用の可能性がある場合
なお、地山条件等、両方のひび割れ発生状況等から、外力の作用が原因であると認められる場合は、その影響を考慮して判定を行うことが考えられる。
補足4) ひび割れ幅が3mm以上でひび割れ長さが5m未満の場合の判定は、ひび割れの発生位置や発生頻度を考慮して、判定を行う。

※「道路トンネル定期点検要領(平成31年3月国土交通省 道路局国道・技術課)」抜粋

表 8.2.18 調査の結果、ひび割れの進行の有無が確認された場合の判定の目安例(矢板工法)

対象箇所	部位区分	外力によるひび割れ				対策区分
		幅		長さ		
覆工	新断面内	3mm以上	3mm未満	5m以上	5m未満	IIa, III
		○	○	○	○	
		○	○	○	○	IV

判定区分補足

II a : 幅 3mm 未満 長さ 5m 未満

III : 現場の状況に応じて判断する

なお、表-解 8.5 及び表-解 8.6 は判定の目安例として示したものである。機械的に適用するのではなく、現場の状況に応じて判定を行う。

不規則なひび割れ等が確認された箇所は、集中的な緩み土圧が作用している可能性があり、有効巻厚の不足または減少が伴う場合、突発性崩壊につながる可能性が懸念される。

従って、上記のような変状が確認された箇所については必要に応じて調査を実施した上で、判定を行う。

※「道路トンネル定期点検要領(平成31年3月国土交通省 道路局国道・技術課)」抜粋

表 4-15 ひび割れの判定の目安（山岳トンネル工法）⁴⁾

【NATM に対する外力性のひび割れの判定の目安】

表 8.2.19 山岳トンネル工法（NATM）の判定目安例

変状状況	対策区分	備考
外力に起因したひび割れの進行性が認められる場合	ⅢまたはⅣ	少なくとも前回の定期点検結果等と比較して進行性がある
外力に起因したひび割れの進行性は認められないが、重点的な監視が望ましい	Ⅱa	
ひび割れの程度は軽微で要因が外力か材質劣化か判別し難しい状況	Ⅱb	和知トンネルで該当変状あり

一方、山岳トンネル工法においては、一般部の覆工は、他の支保構造部材とともにトンネルの安定性を確保する支保構造の一部を構成しているものの、原則として地山からの外力を想定して構造設計されているものではない。そのため、当該覆工スパンに外力によるものと考えられるひび割れが確認された場合は、必要な調査を実施して変状の原因と進行の度合い等を把握した上で判定を行うことが望ましいが、少なくとも前回の定期点検結果等と比較して外力に起因したひび割れの進行性が認められる場合にはⅢまたはⅣとするのがよいと考えられる。外力に起因したひび割れの進行性が認められない場合にも、Ⅱaとして重点的な監視を行っていくことが望ましいが、ひび割れの程度が軽微で要因が外力か材質劣化か判別し難しい状況であればⅡbとすることが考えられる。

※「道路トンネル定期点検要領（平成31年3月 国土交通省 道路局国道・技術課）」抜粋

すなわち、外力性の有無，進行性の有無を判定したうえで，ひび割れの幅，長さによって対策工区分を判定し，スパン毎の健全性の判定を行うという流れになる。

以上より，画像より AI によって抽出したひび割れの属性である幅，長さによって判定区分情報を支援する AI が求める診断支援 AI である。

(2) ひび割れ診断支援 AI

1) 画像系 AI の分類

画像を用いた AI による検出手法は，図 4-51 のように整理される。

CNN による抽出のほか，Instance Segmentation / Semantic Segmentation と呼ばれるピクセル単位の画像分類手法を用いたひび割れ幅を検出する技術も開発されている

また点検支援 AI 技術に対する課題は下記のとおりである。

- ① 微細なひび割れは未検出となる場合がある
- ② ひび割れ抽出では，ひび割れ幅が一定ではなく細いひび割れが未検出となり連続で検出できない場合がある
- ③ 近接目視点検結果による変状展開図では，最大幅で表示するため，AI による抽出との相関を確認する必要がある
- ④ AI による検出結果を評価するシステムはまだ存在しない
- ⑤ 工学的な評価については，実務レベルでいかに活用できるかという視点から評価する必要がある

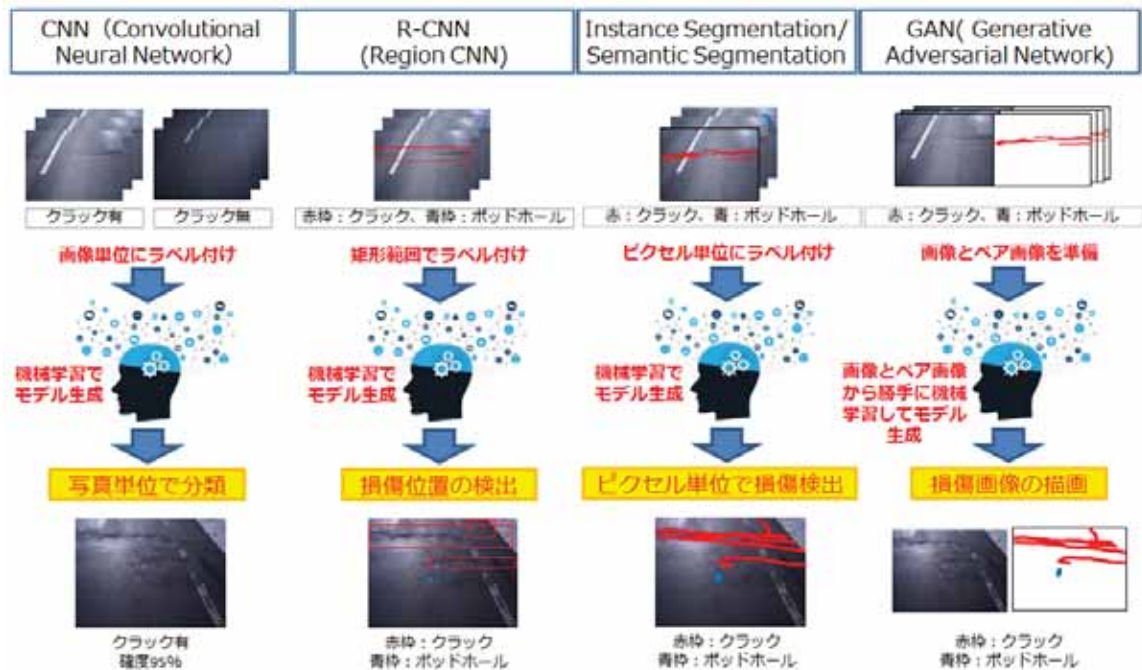


図 4-51 画像系 AI の分類

2) セマンティックセグメンテーションによるひび割れ等の変状抽出

セマンティックセグメンテーションによる損傷検知モデルの構築を行った。モデルは、ケンブリッジ大学が開発した「SegNet」を使用しモデル構築を行い、学習の収束具合を適宜目視確認しながらモデル構築を行った。

計測データ取得後、変状展開図を作成するには、人手による多くの時間と労力を必要とする。労力を軽減するために、ディープラーニングやセマンティックセグメンテーションを適用した変状抽出モデルを開発してきた。

200 スパンのトンネル壁面画像を用いて、漏水、遊離石灰、ひび割れの 3 種類の変状について、セマンティックセグメンテーションによる画素レベルでの教師データを作成した。モデルの性能を評価するために、サンプル外の画像を入力に使用し、漏水、遊離石灰、ひび割れを検出した結果を図 4-52 に示す。

漏水や遊離石灰の検出は良好な結果となっているが、細かいひび割れやチョークや影と区別しにくいひび割れは過剰に検出されていた。品質の低い画像は学習過程での収束不良の原因となる可能性があるため、高品質なひび割れ画像のみを用いて新たな学習データを設定し、学習処理を実施した結果、図 4-52 の右下に示すとおり、再学習したモデルは良好な性能を達成した結果を示している。

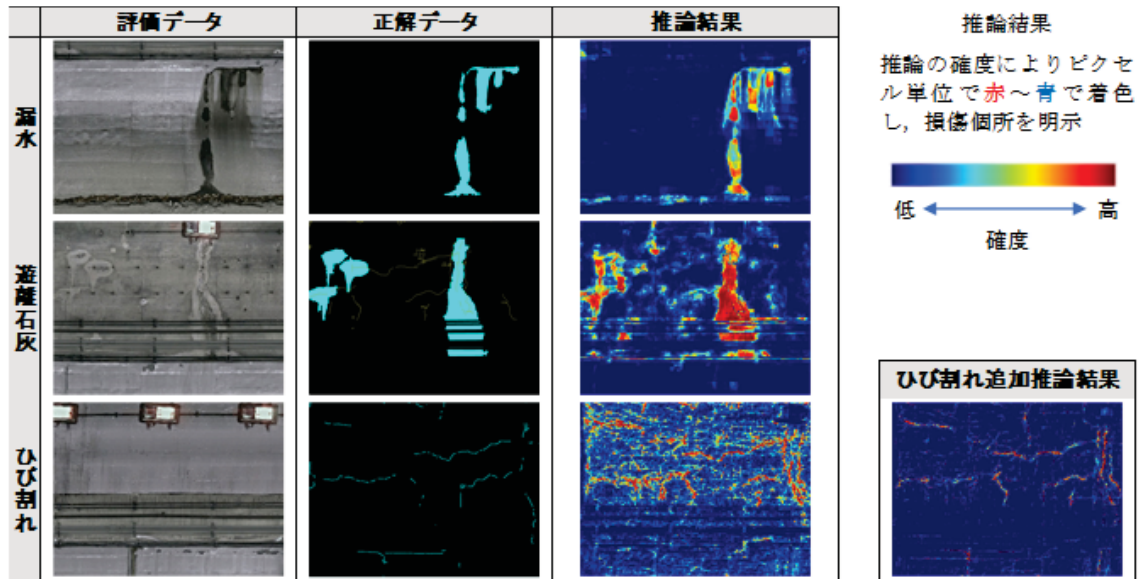


図 4-52 AIによる変状抽出結果

3) ひび割れ区分支援 AI

セマンティックセグメンテーションによって抽出したひび割れに対して、表 4-16 に示す整理区分に分類する。

表 4-16 ひび割れの点検結果の整理区分

定期点検要領に基づく対策区分、ひび割れ変状例			アノテーションに必要なポイント			
			点検結果の整理区分		ひび割れ長さ	
I		ひび割れが生じていない、または生じていても軽微で、措置を必要としない状態	α	I-1	教師データを構築するうえでは、ひび割れの無い健全な状態を映像として収集可能な状態としては、「表面が綺麗な状態」、ひび割れと間違えてしまう「果」、"段差"、"型枠跡"、"汚れ"など、損傷以外で判断に影響しそうな属性を収集する。	5m未満
				I-2	0.3mm未満	
			β	I-3	0.3mm以上～1mm未満	
				I-4	1mm以上～2mm未満	
				I-5	2mm以上～3mm未満	
II-b	ひび割れがあり、その進行が認められないが、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、監視を必要とする状態	II-b	3mm未満	5m以上～10m未満		
II-a	ひび割れがあり、その進行が認められ、将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態	II-a1	3mm未満	10m以上		
		II-a2	3mm以上～5mm未満	5m未満		
III	ひび割れが密集している。またはせん断ひび割れ等があり、構造物の機能が低下しているため、早期に対策を講じる必要がある状態	γ	III-1	3mm以上～5mm未満	5m以上	
			III-2	5mm以上	10m未満	
IV	ひび割れが大きく密集している。またはせん断ひび割れ等があり、構造物の機能が著しく低下している。または圧縮があり、緊急に対策を講じる必要がある状態	IV	5mm以上	10m以上		

ひび割れの整理区分を検出した事例を、図 4-53、図 4-54 に示す。図中に注記しているように、ひび割れ抽出が途中で切れており連続ひび割れとしての評価ができない、ひび割れ幅を過剰に検出しているなどの課題が認められ、改善する必要性がある。

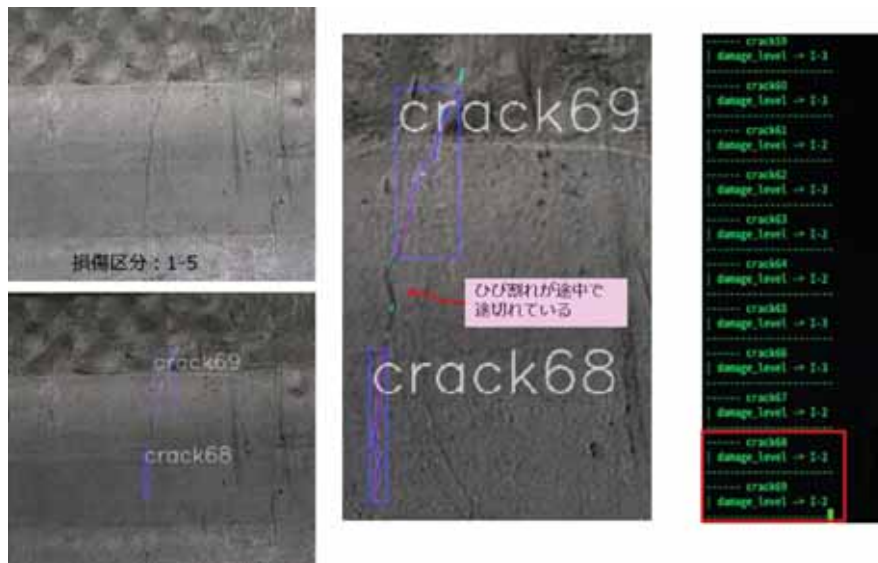


図 4-53 ひび割れ整理区分の検出例 1

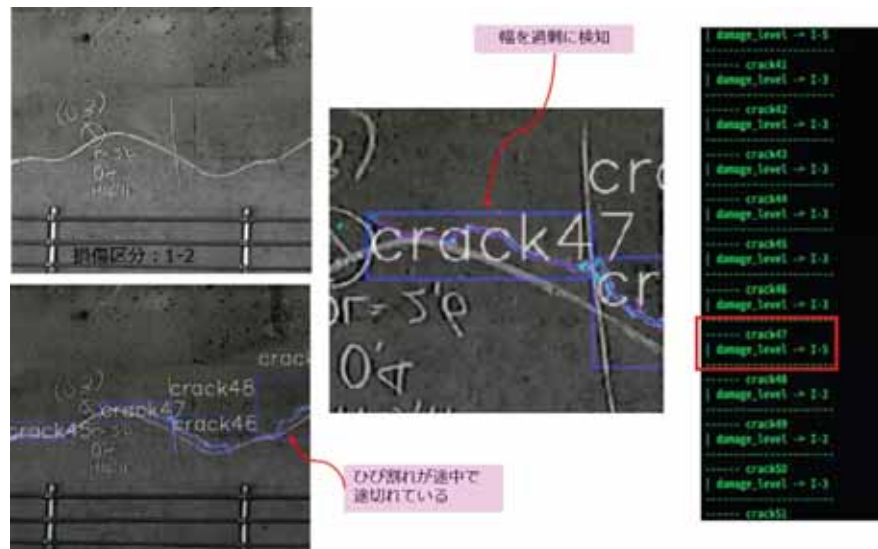


図 4-54 ひび割れ整理区分の検出例 2

4.2.2 外力性診断 AI

(1) 外力性診断の必要性

トンネルの点検・診断では、ひび割れや変形の進展、うき・はく離、背面空洞などの覆工の状態把握が重要である。中でも外力性は近接目視のみでは要因の特定が困難な場合があり、外力性要因か否かの適切な判断が求められている。

外力による変状を客観的に判定する手法として、MIMM-R の高密度レーザで取得した点群から覆工の変形を評価する変形モード解析を行うことで、外力を受けている箇所の変状要因推定を行う技術を開発した。併行してカメラで取得した覆工壁面画像からひび割れ、漏水等の変状抽出を行う AI の開発を進めてきた。

(2) 外力による変状要因の診断支援 AI のフロー

変形モード解析結果と AI による変状検知結果を組合せて学習し、外力性の変状の発生を推定する外力性判定支援 AI を開発した。このワークフローを図 4-55 に示す。

本技術により、客観的な判断材料に基づき外力性判定を支援することが可能となり、外力性変状の問題箇所の抽出や、従来は外力性と判定されているような事象に対しても、外力性変状では無いことを示すことが可能となるなどトンネル点検・診断支援に寄与するものと期待される。

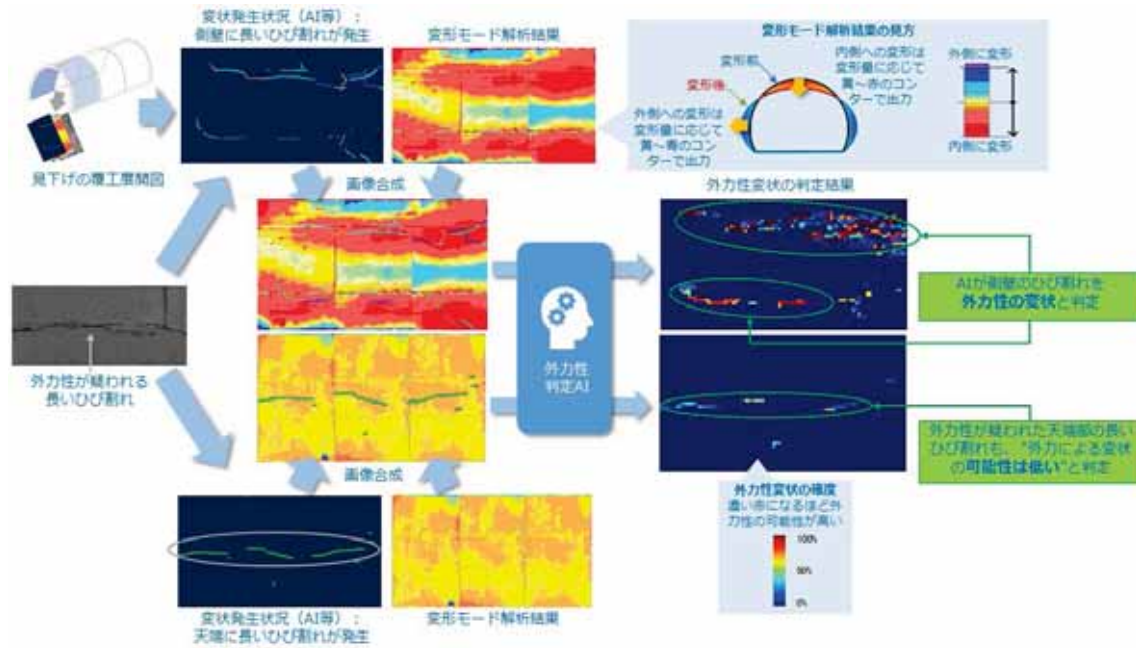


図 4-55 外力による変状要因の診断支援 AI のフロー

(3) 外力性診断の事例

本手法により外力性診断支援を行った事例を、図 4-56 に示す。従来は人力によって外力性判定を行っていたが、人力によって培ってきた知見をもとに AI 支援により外力性判定支援を行うことが可能となる。

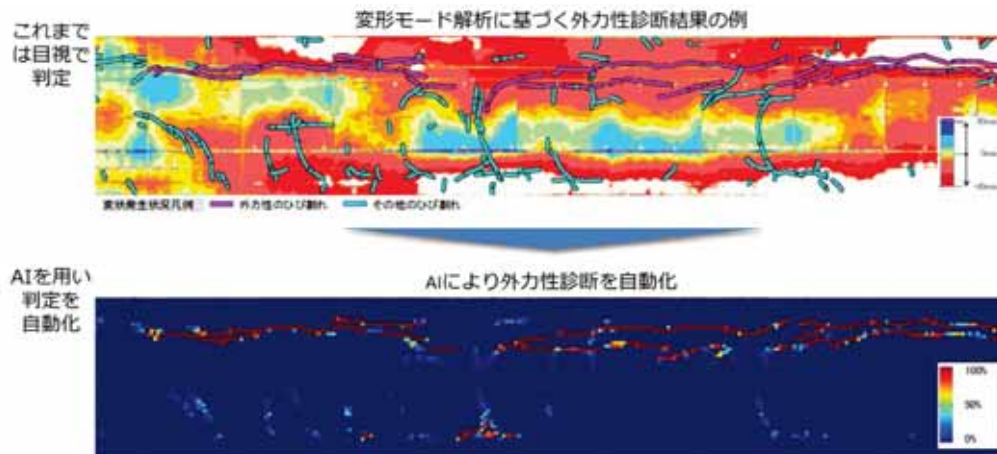


図 4-56 外力性診断 AI の事例

参考文献

- 1) 道路統計年報 2020 トンネルの現況，国土交通省
- 2) 道路の老朽化対策の本格実施に関する提言，社会資本整備審議会道路分科会，平成 26 年 4 月 14 日
- 3) 次世代社会インフラ用ロボット開発・導入重点分野，国土交通省，平成 26 年 12 月 25 日
- 4) 道路トンネル定期点検要領，国土交通省，平成 31 年 3 月
- 5) 「橋梁，トンネルの点検支援技術」公募資料，別添 1 点検支援技術の開発の方向性について，国土交通省 道路局国道・技術課，令和 2 年 12 月 15 日

5 点検データ格納

本章では、点検データ格納の概念・要求を述べるに先立って、現状のトンネル点検業務従来手法（近接目視による点検対応）及び点検支援技術により取得したデータによるトンネル管理の実現及び、現在における点検成果のデータ格納について整理する。研究を進めるにあたり、対象とする点検項目及び点検記録様式は、国土交通省にて使用している道路トンネル定期点検要領¹⁾の様式とした。

データ格納の現状を整理した上で、茨城県の実証を踏まえ、県の要望・課題を整理した上で、今後のデータ管理の在り方について説明する。

5.1 データ格納の現状

国土交通省道路トンネル定期点検記録様式¹⁾は、以下に示す 15 様式で構成される。これらの様式は、Excel 形式で納品されている。

表 5-1 国土交通省トンネル定期点検 点検記録様式一覧

	様式番号	記録内容	
①	様式 S-1	トンネル 台帳	トンネル諸元、非常用施設諸元
②	様式 S-2		トンネル情報一覧表
③	様式 S-3		トンネル記録（位置図、断面図、施工実績他）
④	様式 A-1	点検調書	トンネル変状・異常箇所写真位置図
⑤	様式 A-2		変状写真台帳
⑥	様式 B-1(a)		トンネル全体の変状展開図
⑦	様式 B-1(b)		トンネル全体の変状展開図（ロボット活用時の例）
⑧	様式 C-1-1		変状写真台帳（対策区分の判定の記録例）
⑨	様式 C-1-2		異常写真台帳
⑩	様式 C-2-1		点検結果総括表（トンネル本体工）
⑪	様式 C-2-2		点検結果総括表（トンネル内付属物の取付状態）
⑫	様式 C-3		覆工スパン別変状詳細展開図
⑬	様式 C-4		調査・措置の履歴
⑭	様式 C-5		近接目視による状態の把握が不可能な箇所
⑮	様式 C-6		診断調書

5.1.1 現状の点検データ

5.1 で示した道路トンネル定期点検記録様式¹⁾に含まれるデータ項目を下表に整理する。過去の点検記録を参照できるようにするために、定期点検記録様式¹⁾の入力項目をデータ項目として抽出している。

表 5-4 現状の点検記録様式のデータ項目(3)

様式番号	形式名	項目名	項目名	備考	項目名(結合)	分類
S-2	トンネル台帳	トンネル情報一覧表	非常用施設		非常用施設_遊離連絡坑	遊離連絡坑
S-2	トンネル台帳	トンネル情報一覧表	非常用施設		非常用施設_JF	非常用施設
S-2	トンネル台帳	トンネル情報一覧表	非常用施設		非常用施設_監視装置 (CCTV)	非常用施設
S-2	トンネル台帳	トンネル情報一覧表	非常用施設		非常用施設_特記事項	非常用施設
S-2	トンネル台帳	トンネル情報一覧表	換気施設		換気施設_JF	換気施設
S-2	トンネル台帳	トンネル情報一覧表	換気施設		換気施設_VIH	換気施設
S-2	トンネル台帳	トンネル情報一覧表	換気施設		換気施設_CO計	換気施設
S-2	トンネル台帳	トンネル情報一覧表	換気施設		換気施設_風向風速計	換気施設
S-2	トンネル台帳	トンネル情報一覧表	換気施設		換気施設_特記事項	換気施設
S-2	トンネル台帳	トンネル情報一覧表	その他附属物等		その他附属物等	その他附属物等
S-3	トンネル台帳	トンネル記録 (位置図、断面図、施工装備他)	フリガナ		フリガナ	トンネル諸元情報
S-3	トンネル台帳	トンネル記録 (位置図、断面図、施工装備他)	名称		名称	トンネル諸元情報
S-3	トンネル台帳	トンネル記録 (位置図、断面図、施工装備他)	路線名		路線名	トンネル諸元情報
S-3	トンネル台帳	トンネル記録 (位置図、断面図、施工装備他)	管理者名		管理者名	トンネル諸元情報
S-3	トンネル台帳	トンネル記録 (位置図、断面図、施工装備他)	作成者		作成者	換気情報
S-3	トンネル台帳	トンネル記録 (位置図、断面図、施工装備他)	作成年月日		作成年月日	換気情報
S-3	トンネル台帳	トンネル記録 (位置図、断面図、施工装備他)	位置図・状況写真・標準断面図・地質縦断面図・施工装備		位置図・状況写真・標準断面図・地質縦断面図・施工装備	図面情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	トンネルID		トンネルID	トンネル諸元情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	フリガナ		フリガナ	トンネル諸元情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	名称		名称	トンネル諸元情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	路線名		路線名	トンネル諸元情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	管理者名		管理者名	トンネル諸元情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	定期点検者		定期点検者	トンネル点検情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	定期点検者		定期点検者	トンネル点検情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	定期点検年月日		定期点検年月日	トンネル点検情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	トンネル延長		トンネル延長	トンネル諸元情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	トンネル分頓		トンネル分頓	トンネル諸元情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	緊急輸送道路		緊急輸送道路	トンネル諸元情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	代替路の有無		代替路の有無	トンネル諸元情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	所在地		所在地	トンネル諸元情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	所在地		所在地_自	トンネル諸元情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	起点		起点	トンネル諸元情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	終点		終点	トンネル諸元情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	終点		終点_経度	トンネル諸元情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	終点		終点_緯度	トンネル諸元情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	終点		終点_経度	トンネル諸元情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	変状・異常箇所数合計		変状・異常箇所数合計_トンネル本体工	トンネル諸元情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	変状・異常箇所数合計		変状・異常箇所数合計_トンネル本体工	トンネル諸元情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	変状・異常箇所数合計		変状・異常箇所数合計_トンネル本体工	トンネル諸元情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	トンネル毎の健全性		トンネル毎の健全性	トンネル点検情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	附属物の取付状態		附属物の取付状態_○ (応急措置後)	トンネル点検情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	附属物の取付状態		附属物の取付状態_X	トンネル点検情報
A-1	定期点検記録様式	トンネル変状・異常箇所等位置図	トンネル変状・異常箇所等位置図		トンネル変状・異常箇所等位置図	トンネル点検情報
A-2	定期点検記録様式	変状写真台帳	フリガナ		フリガナ	トンネル諸元情報
A-2	定期点検記録様式	変状写真台帳	名称		名称	トンネル諸元情報
A-2	定期点検記録様式	変状写真台帳	路線名		路線名	トンネル諸元情報
A-2	定期点検記録様式	変状写真台帳	管理者名		管理者名	トンネル諸元情報
A-2	定期点検記録様式	変状写真台帳	定期点検者		定期点検者	トンネル点検情報
A-2	定期点検記録様式	変状写真台帳	定期点検者		定期点検者	トンネル点検情報
A-2	定期点検記録様式	変状写真台帳	定期点検年月日		定期点検年月日	トンネル点検情報
A-2	定期点検記録様式	変状写真台帳	写真番号		写真番号_覆工スペース番号	変状情報

表 5-5 現状の点検記録様式のデータ項目(4)

様式名	項目名	項目名	備考	項目名(結合)	分類案
A-2	定期点検記録様式	変状番号	変状写真ごとに記載	写真番号, 変状番号	変状情報
A-2	定期点検記録様式	変状部位	変状写真ごとに記載	変状部位, 対象箇所	変状情報
A-2	定期点検記録様式	変状部位	変状写真ごとに記載	変状部位, 部位区分	変状情報
A-2	定期点検記録様式	変状区分	変状写真ごとに記載	変状区分	変状情報
A-2	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	変状種類	変状情報
A-2	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	健全性, 応急措置前	トンネル診断情報
A-2	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	健全性, 応急措置後	トンネル診断情報
A-2	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	変状の発生範囲の規模	変状情報
A-2	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	前回定期点検時の状態	変状情報
A-2	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	調査方針	変状情報
A-2	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	対策履歴	変状情報
A-2	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	実施状況(実施日)	変状情報
A-2	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	メモ	トンネル措置情報
B-1(a)	定期点検記録様式	トンネル全体変状展開図	変状写真ごとに記載	フリガナ	変状情報
B-1(a)	定期点検記録様式	トンネル全体変状展開図	変状写真ごとに記載	名称	トンネル補充情報
B-1(a)	定期点検記録様式	トンネル全体変状展開図	変状写真ごとに記載	路線名	トンネル補充情報
B-1(a)	定期点検記録様式	トンネル全体変状展開図	変状写真ごとに記載	管理者名	トンネル補充情報
B-1(a)	定期点検記録様式	トンネル全体変状展開図	変状写真ごとに記載	定期点検業者	トンネル補充情報
B-1(a)	定期点検記録様式	トンネル全体変状展開図	変状写真ごとに記載	定期点検年月日	トンネル補充情報
B-1(a)	定期点検記録様式	トンネル全体変状展開図	変状写真ごとに記載	トンネル変状展開図	トンネル補充情報
B-1(b)	定期点検記録様式	トンネル全体変状展開図	非構造データ	フリガナ	トンネル補充情報
B-1(b)	定期点検記録様式	トンネル全体変状展開図	機器を用いた記録, (a)と併記	名称	トンネル補充情報
B-1(b)	定期点検記録様式	トンネル全体変状展開図	機器を用いた記録, (a)と併記	路線名	トンネル補充情報
B-1(b)	定期点検記録様式	トンネル全体変状展開図	機器を用いた記録, (a)と併記	管理者名	トンネル補充情報
B-1(b)	定期点検記録様式	トンネル全体変状展開図	機器を用いた記録, (a)と併記	定期点検業者	トンネル補充情報
B-1(b)	定期点検記録様式	トンネル全体変状展開図	機器を用いた記録, (a)と併記	定期点検年月日	トンネル補充情報
B-1(b)	定期点検記録様式	トンネル全体変状展開図	機器を用いた記録, (a)と併記	トンネル変状展開図	トンネル補充情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	フリガナ	変状情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	名称	トンネル補充情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	路線名	トンネル補充情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	管理者名	トンネル補充情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	定期点検業者	トンネル補充情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	定期点検年月日	トンネル補充情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	写真番号	変状情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	写真番号, 変状番号	変状情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	対象箇所	変状情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	変状部位, 対象箇所	変状情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	変状部位	変状情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	変状区分	変状情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	変状種類	変状情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	対象区分, 応急措置前	トンネル診断情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	対象区分, 応急措置後	トンネル診断情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	健全性	変状情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	変状の発生範囲の規模	変状情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	前回定期点検時の状態	変状情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	調査方針	変状情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	対策履歴	変状情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	実施状況(実施日)	変状情報
C-1-1	定期点検記録様式	変状写真台帳	変状写真ごとに記載	メモ	トンネル措置情報

5.1.2 ヒアリング結果に基づくデータ管理のあり方

現状の点検業務を実施されている茨城県からの点検システム・データに対するご意見・ご要望を「帳票の活用」、「3次元データの有効性」、「望ましい管理システム」に分類し、表 5-9 に示す。

表 5-9 トンネル点検データ管理システムに関するご意見・ご要望(茨城県)

分類	内容
帳票の活用について	<ul style="list-style-type: none"> 必要な情報は、トンネル毎の現況把握、判定区分根拠、問題箇所、補修優先度など 補修履歴をシステム管理したい
3次元データの有効性	<ul style="list-style-type: none"> 3次元データは有効と思われるが、具体的な活用方法の検討が必要
	<ul style="list-style-type: none"> 判定結果のみダッシュボードでWEB表示できるとよい
望ましい管理システム	<ul style="list-style-type: none"> データの汎用性、互換性が重要、システム切替が可能
	<ul style="list-style-type: none"> 遠隔監視、診断は同一基準で判定できるため有効
	<ul style="list-style-type: none"> データ管理はクラウドを活用したい
	<ul style="list-style-type: none"> 予算上の制約が大きく、補修に予算をあてると点検予算確保が難しい ⇒ コストを抑えた点検手法

上記、茨城県のご意見・ご要望を踏まえ、次節で点検システムの要件を整理する。

5.2 トンネル点検データ管理システムの要件

現状の点検業務を踏まえた要求事項から、トンネル点検データ管理システムの要件は下表のとおりである。

表 5-10 トンネル点検データ管理システムへの要求事項

点検の目指したい姿(茨城県)	要求事項 下線…ルールでの実現事項
・ 帳票にないデータの活用	・ 帳票記載データ，帳票に記載されていないデータをとにも管理できること
・ 履歴データの活用	・ 補修履歴等のデータを点検システムで管理できること
・ 3次元データの活用方法の具体化	・ <u>3次元データの作成方法・活用方法のガイドラインが定められていること</u>
・ Web・ダッシュボードでの点検結果データの閲覧 ・ 点検データサマリの閲覧	・ 点検結果を Web・ダッシュボードで確認できること
	・ 点検データを集計できること
	・ <u>点検データの標準仕様が策定されていること</u>
・ 汎用性・互換性の高い点検データ ・ 同一基準での損傷・異常判定 →遠隔監視，診断の実施	・ 標準仕様のデータを点検システムで利用できること
	・ 損傷・異常を把握できるビューをもつ点検システムの活用できること
・ 点検データのクラウド化	・ <u>点検データの標準仕様が策定されていること</u> ・ 点検データがクレンジング・一元化されていること
・ 点検コストの抑制 →現地調査回数の低減，現場作業の効率化	・ 現地の状況を点検システムでシミュレーションできること

加えて，同一基準での損傷・異常判定に関して，AI を活用するという手段も考えられる。要求事項としては，時系列・位置データを点検システムで活用できることが挙げられる。

表 5-11 トンネル点検データ管理システムへの要求事項(追加)

点検の目指したい姿(追加)	要求事項
AI を活用した一時損傷抽出	・ 教師データの作成が容易であること
同一基準での判定	・ 時系列・位置データを点検システムで活用できること

下表は、要求事項からシステムへの要件を整理した結果である。

表 5-12 トンネル点検データ管理システムの要件

要求事項	システムへの要件
・現地の状況をシミュレーションできること	3次元形状データと画像データを蓄積・表示できること
・帳票記載データ，帳票に記載されていないデータとともに蓄積できること	帳票として出力したい項目を蓄積し，点検帳票を出力できること
・点検データを集計できること	点検データを編集・集計できること
・点検データがクレンジング・一元化されていること	点検データを編集・集計できること
・点検・補修データが時間に関する情報を持っていること	点検・補修履歴データを蓄積・表示・編集できること
・各種履歴データを蓄積できること	点検・補修履歴データを蓄積・表示・編集できること
・損傷・異常を把握できるビューをもつシステムの活用	損傷・異常等の判定結果を蓄積・表示・編集できること
・時系列・位置データを活用できること	蓄積したデータを経時比較できること
・教師データの作成が容易であること	蓄積したデータから教師データを作成できること
・点検結果を Web 上で確認できること	データ表示が Web でなされること
・標準仕様のデータをシステムで利用できること	標準仕様のデータを蓄積できること
	データが交換可能であること

下表のとおり，要件を分類し，要件項目名を付した。

表 5-13 トンネル点検データ管理システムの要件項目名

システムへの要件	要件種別	No.	機能・非機能要件項目名
3次元形状データと画像データを蓄積・表示できること	機能要件	(1)(a)	現況データ蓄積・表示
帳票として出力したい項目を蓄積し，点検帳票を出力できること	機能要件	(1)(b)	帳票データ蓄積・出力
点検データを編集・集計できること	機能要件	(1)(c)	点検データ編集・集計
点検・補修履歴データを蓄積・表示・編集できること	機能要件	(1)(d)	点検・補修履歴データ蓄積・表示
損傷・異常等の判定結果を蓄積・表示・編集できること	機能要件	(1)(e)	損傷・異常データ蓄積・表示
蓄積したデータを経時比較できること	機能要件	(1)(f)	経時比較表示
蓄積したデータから教師データを作成できること	機能要件	(1)(g)	教師データ作成
データ表示がWeb・ダッシュボードでなされること	非機能要件	(2)(a)	システム方式
標準仕様のデータを蓄積できること	機能要件	(1)(a)	現況データ蓄積
データが交換可能であること	非機能要件	(2)(b)	中立性

5.2.1 機能要件

(1) 現況データ蓄積・表示

現況を表現する3次元形状データ，画像データを蓄積できること

(2) 帳票データ蓄積・出力

帳票として出力したいデータを蓄積・エクスポートできること

(3) 点検データ編集・集計

点検結果をシステム上で入力・変更でき、結果を集計した形で表示できること

(4) 点検・補修履歴データ蓄積・表示

点検・補修履歴データを取り込み、表示できること

(5) 損傷・異常データ蓄積・表示

- ・ 机上にて損傷・異常の程度を把握するため、損傷・異常の3次元形状モデル、もしくは発生箇所と状況データを取り込み、表示できること
- ・ また、周辺状況の確認のため、損傷・異常データと現況データを重畳表示できることが望ましい。

(6) 経時比較表示

- ・ 構造物の概形変化を把握するため、現況データ同士を時系列で比較できること
- ・ 変状・異常の進行を確認するため、損傷・異常データ同士を時系列で比較できること

(7) 教師データ作成

- ・ AI活用のための教師データを作成できること。
蓄積されている画像の位置、時刻情報が精緻であり、自動的に切り出せることが望ましい。

5.2.2 非機能要件

(1) システム方式

- ・ トンネル点検データ管理システムのアーキテクチャについては、蓄積されているデータサイズによってはシステム利用コストが増大するため、オンプレミス又はクラウド型のいずれかを選択できることが望ましい。
- ・ 点検結果を参照するためのシステムアーキテクチャについては、Webクライアント型とする。

(2) 中立性

- ・ 提供するハードウェア及びソフトウェア等は、特定ベンダーの技術に依存しない、オープンな技術仕様に基づくものとする。
- ・ 将来的なシステム更改の際に、移行の妨げや特定の装置や情報システムに依存することを防止するため、原則としてトンネル点検管理システム内のデータ形式は3次元成果納品マニュアル（案）³⁾で定められた標準的な形式で入力・出力することができること。

5.2.3 実現のために必要となるデータ

上記 5.2.1, 5.2.2 の要件の実現のため、必要となるデータの概要を下表に示す。

表 5-14 システム機能・非機能要件の実現のために必要となるデータ

要件種別	No.	機能・非機能要件 項目名	必要となるデータ
機能要件	(1)(a)	現況データ蓄積・ 表示	現況データ(3次元形状データ・画像データ)
機能要件	(1)(b)	帳票データ蓄積・ 出力	点検結果データ(帳票用)
機能要件	(1)(c)	点検データ編集・ 集計	点検結果データ
機能要件	(1)(d)	点検・補修履歴 データ蓄積・表示	点検結果データ(損傷・異常)※時刻保持 補修結果データ※時刻保持
機能要件	(1)(e)	損傷・異常データ 蓄積・表示	点検結果データ(損傷・異常) メタデータ
機能要件	(1)(f)	経時比較表示	点検結果データ(損傷・異常)※位置・時刻保持 現況データ(3次元形状データ・画像データ) ※位置・時刻保持
機能要件	(1)(g)	教師データ作成	点検結果データ(損傷・異常)
非機能要件	(2)(a)	システム方式	標準化された(1)のデータ
非機能要件	(2)(b)	中立性	標準化された(1)のデータ

下表において、必要となるデータを、データ種の観点から整理した。

表 5-15 必要となるデータのサマリ

		データ形式	例
現況データ		3次元形状データ	3次元CAD, 点群
		画像データ	デジタルカメラ, ラインカメラ 画像
メタデータ		テキスト・CSVデータ	点検写真番号と取得位置
点検結果データ	損傷・異常データ	3次元形状データ	損傷形状のポリゴン
		画像データ	点検写真
	帳票用データ	テキスト・CSVデータ	損傷程度等
補修データ		画像データ	点検写真
		テキスト・CSVデータ	補修状況等

5.3 データ格納要件

5.3.1 現状の点検データの分析

(1) 点検様式に含まれる記入項目

図 5-1 は「道路トンネル点検記録様式」²⁾における記入項目の一覧である。

(2) 課題

現状の納品データ，点検様式，様式内に含まれる記入項目より，以下が課題となる．

【点検作業負荷に関するもの】

① 記載項目の重複

各様式へのヘッダ部分の記載等，同じ情報を複数回記入する必要がある

②新技術との親和性

点検写真等の貼り付け形式と新技術での出力データ形式に乖離がある

③点検以外の情報の記入

設計や施工等の前工程の情報を記載せねばならない

【点検精度に関するもの】

④記載誤りの混入

記入者は，様式間の整合性を考慮して記載せねばならない．一方で，記入例に従った形式で記載されていない場合もある

⑤要対応箇所の位置記入のばらつき

位置の記載方法が複数パターン存在する．また，現地に対応箇所を特定できない可能性がある

⑥参考情報の精度

トンネル諸元の参照情報に設計情報が記載されていると，実際の構造物の施工状況と異なる情報となる場合がある(例えばスパン長)．

【その他】

⑦各様式間の関係

トンネル ID で様式間を対応付ける場合とトンネル名で対応付ける場合が混在している．また，トンネル ID で対応付いている様式でも，トンネル単位で管理すべきデータと，施設や設備単位で管理すべきデータが 1 様式内に混在してる．

(3) 対応方針

前述の課題に対し，以下対応方針とする．

【点検作業負荷に関するもの】

①記載項目の重複⇒項目の一元化

登録・更新対象のデータ項目の重複を削除し，キーを明確にすることで集約する．

②新技術との親和性

点検写真等の貼り付け形式と新技術での出力データ形式を同一とする

- ③点検以外の情報の記入→工程間のデータ共有設計や施工等の前工程の情報を点検でも活用できるよう、管理可能とする。

【点検精度に関するもの】

- ④記載誤りの混入⇒記載誤りの防止

情報間の関連を明らかにし、制約を予め付与しておくことで、データの記入誤りを防止する。

- ⑤要対応箇所の位置記入のばらつき

構造物、変状等，“モノ”のデータに、測定データで取得した位置情報を付与し、存在する箇所を特定可能にする。

- ⑥参考情報の精度⇒精度の改善

実際の構造物の測定値を利用できるようにする。

【その他】

- ⑦各様式間の関係⇒様式と図面のデータ化

様式・図面に関するデータは管理対象とする。加えて、適切なキー項目を設定することで、情報間の関連性を明らかにする。

5.3.2 格納対象データ

(1) 現況データ

構造物、損傷等現地の状況が表現されているデータ。画像、3次元形状データを含む。具体的な項目案は以下とする。

表 5-16 現況データの項目案

	画像のデータ項目		3次元点群のデータ項目
画像	画像 ID	3次元点群	点群 ID
	画像		X
	位置区分		Y
	カメラの位置		Z
	カメラの角度		時刻
	画像の中心座標		反射強度
	画像の角度		取得 ID
	四隅の座標_左上		構造物・設備区分
	四隅の座標_左下		構造物 I・設備 ID(トンネル ID など)
	四隅の座標_右上		データ取得 ID
	四隅の座標_右下	取得日	
	変状・異常の有無	取得業者	
	時刻	取得機器名	
	データ取得 ID	データ取得情報	機器メーカー名

(2) メタデータ

表 5-16 において記載した現況データの主たるデータは、画像や一部の 3次元形状(CAD 等)データであるが、通常のリレーショナルデータベースではデータ単位でしか扱うことができない。そのため、現況データを直接的に他データと紐付けることが難しい(このようなデータを非構造データと呼ぶ)。そこで、現況データのうち、非構造データの特徴を文字列で抽出した”メタデータ”を作成し、現況データ(非構造データ)と他データの関連性を明らかにする。

1) メタデータの役割

メタデータは、現況データと点検記録情報、現況データ間の関連情報を明示する役割を持つ。

(a)現況データと点検記録情報の紐付け

現況を表す 3次元形状データもしくは画像データと点検記録データを関連付ける。

(b)現況データ間の紐付け

3次元形状データ同士、画像データ同士、また 3次元形状データと画像を関連付ける。

2) メタデータ項目

現況データのうち、メタデータとして出力する対象のデータを以下に示す。

ここでは、3次元点群を取得した例を掲載している。

表 5-17 メタデータの項目案

		メタデータ対象			メタデータ対象
画像	画像 ID	○	3次元点群	点群 ID	不要
	画像	(非構造データ)		X	○
	位置区分	○		Y	
	カメラの位置	○		Z	
	カメラの角度			時刻	
	画像の中心座標			反射強度	不要
	画像の角度			データ取得 ID	○
	四隅の座標_左上			構造物・設備区分	○
	四隅の座標_左下			構造物 ID・設備 ID (トンネル ID など)	○
	四隅の座標_右上			データ取得情報	データ取得 ID
	四隅の座標_右下		取得日		○
	変状・異常の有無	○	取得業者	不要	
	時刻	○	取得機器名	不要	
	データ取得 ID	○	機器メーカー名	不要	

(3) 点検結果・補修データ

点検の実施，点検対象の記録データ．具体的な項目案は以下とする．

表 5-18 点検結果・補修データの項目案

トンネル点検・診断情報	点検 ID	変状・異常別診断情報	点検 ID
	点検年月日		トンネル ID
	点検業者		変状・異常番号
	点検者		診断 ID
	健全性		措置の要否
	トンネル ID		調査の要否
スパン別点検情報	データ取得 ID	変状・異常別診断情報	応急措置前健全性
	点検 ID		対応方針・特記事項
	覆工スパン番号		応急措置前対策区分
	点検年月日	措置情報	点検 ID
	点検業者		トンネル ID
	点検者		変状・異常番号
	健全性		措置 ID
調査方針	実施日		
トンネル ID	応急措置前の判定区分		
トンネル点検詳細情報	点検 ID		措置情報
	状態の把握内容	応急措置の内容	
	状態の把握年月日	応急措置後健全性	
	状態の把握結果	応急措置後対策区分	
	近接目視が不可能な理由		
	対応策		
	備考		
	特記事項		

5.3.3 格納方法

3次元成果品納品³⁾データを検索・閲覧等活用する仕組みのため、予め定められた構成で格納されることが望ましい。納品時の構成を以下に示す。

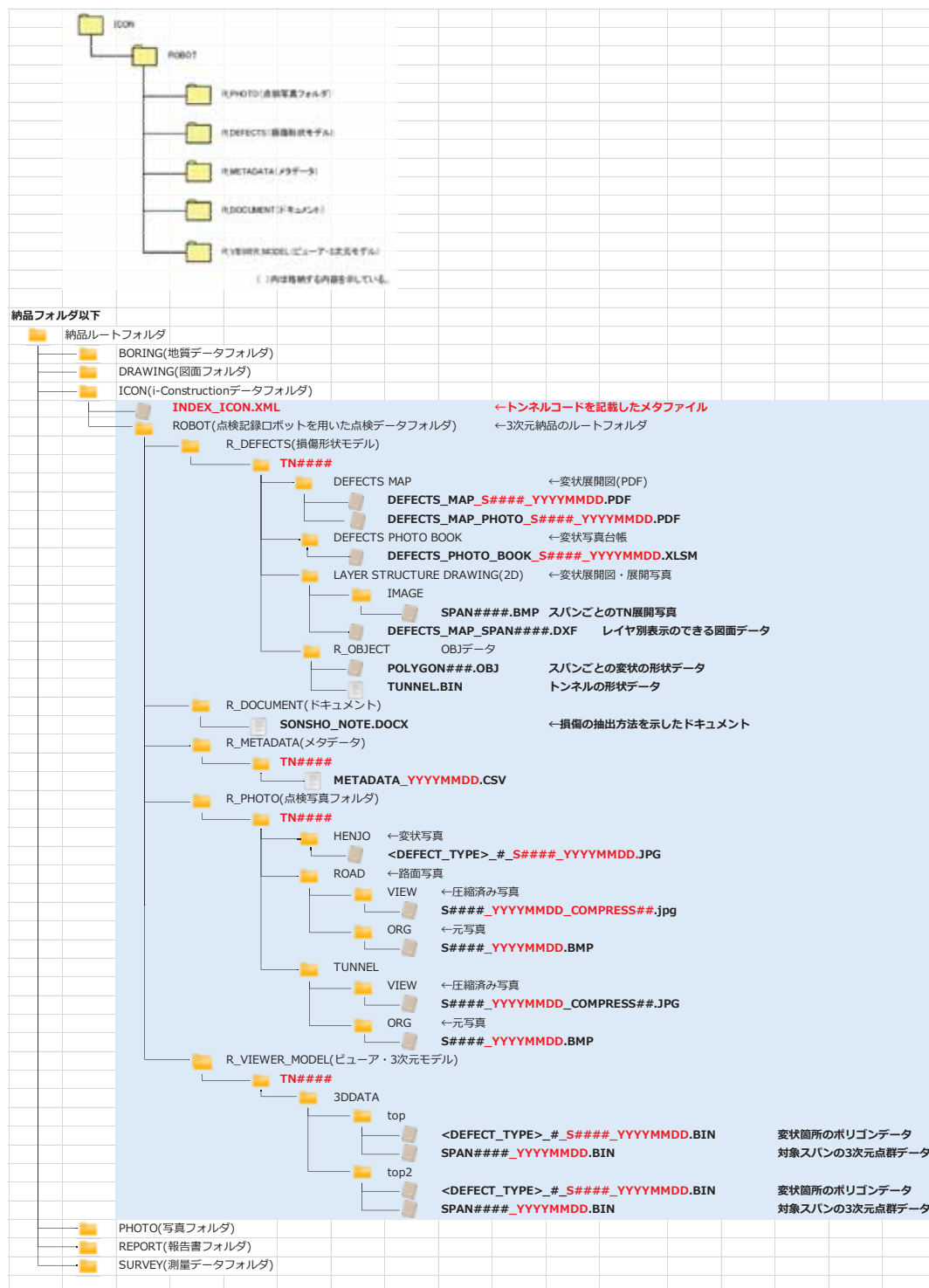


図 5-2 3次元成果品納品²⁾データ 格納フォルダ

上記、各ファイルには、以下のとおりデータ項目が含まれている。各々の項目の概要を以下に示す。

表 5-20 3次元成果品納品 3時のファイルに含まれる情報項目

ファイル名	サブフォルダ	ファイル名	項目	MMSDデータ内容	拡張子	備考		
フォルダ	サブフォルダ2	サブフォルダ1						
		<root>						
		R_DEFECT(収束状況モジュール)						
		DEFECTS MAP	点検写真	トンネル名称	R_PHOTO点検写真フォルダ内PHOTOフォルダと同一の写真ファイルに保存。			ファイル名保存
			トンネル座元	頭端名	(5)資料採取 トンネル右側 トンネル座元へ送る			
				管理番号	(5)資料採取 トンネル右側 トンネル座元へ送る			
				点検年月日	(5)資料採取 トンネル右側 トンネル座元へ送る			
				調査業者・調査技術者名	(5)資料採取 トンネル右側 トンネル座元へ送る			
				調査年月日	(6)点検結果書 計測結果欄に記載の点検年月日に従う。			
				調査年月日	(6)点検結果書 計測結果欄に記載の点検年月日に従う。			
				写真番号	(5)数字4桁)1とする。			
				点検箇所	点検箇所欄にシステムで付与したIDを出力する。			
				点検区分	右上、頭端のどちらか			
		DEFECTS PHOTO BOOK	点検区分	点検区分	右アーチ、左アーチ、右側壁、左側壁のいずれか			
			点検種類	点検種類	ひび、漏水、剥離、その他(のいずれか)			
健全性	健全性		空欄とする。					
変位の発生範囲の規模	変位の発生範囲の規模		空欄とする。					
前回の点検時の状態	前回の点検時の状態		発生範囲の幅(m)×高さ(m)					
調査(方針)	調査(方針)		空欄とする。					
調査(方針)	調査(方針)		空欄とする。					
メモ	メモ		空欄とする。					
			写真撮影	/R_PHOTO/TUNNEL/フォルダ内の写真画像をリンク先とする。				
			写真撮影	スキャン時の距離とする。				
LAYER STRUCTURE DRAWING(2D)	TUNNEL							
	レイヤ別階層データ							
	断面座標写真(スパン毎)							
	構築物3次元データ							
	R_OBJECT							
	R_DOCUMENT(ドキュメント)							
	R_METADATA(メタデータ)							
	位置情報記入方法	位置情報記入方法	点検箇所の中心座標をXYZ座標、3つめの座標を断面で出力する。			半角数字		
	X座標(ワールド座)	X座標(ワールド座)	点検写真内の点以上の座標もしくは、断面上に座標を付与し出力する			半角数字、ピリオド		
	Z座標(ワールド座)	Z座標(ワールド座)	点検写真の幅、縦寸法(単位:mm)、ビューに表示される点検写真の幅、縦寸法(単位:mm)、幅、高さの比率を生写時のピクセル数と同一にする。			半角数字、ピリオド		
	写真寸法 幅	写真寸法 幅	点検写真の幅、縦寸法(単位:mm)			半角数字		
	写真寸法 高さ	写真寸法 高さ	ビューに表示される点検写真の幅、縦寸法(単位:mm)、幅、高さの比率を生写時のピクセル数と同一にする。			半角数字		
	相對パス	相對パス	/../R_PHOTO/PHOTO/ 指定とする。			半角数字、半角記号		
	点検写真ファイル名	点検写真ファイル名	点検写真のファイル名を指定する。			半角数字、半角記号		
	点検写真の撮影日時	点検写真の撮影日時	点検写真の撮影年月日を入力する。			日付		
撮影法	撮影法	点検写真の中心座標、正射投影の区分、中心座標は0。			半角数字			
対象部分	対象部分	正射投影は1を記入する			半角数字			
撮影の有無	撮影の有無	撮影の有無を記入する。重入したID番号を記入する。			半角数字			
R_PHOTO(点検写真フォルダ)	PHOTO							
	ROAD							
	TUNNEL							
	R_VIEWER_MODEL(ビューア・3次元モデル)							
	3DDATA							
	top							
	点検写真	点検写真	点検写真の撮影年月日を入力する。			半角数字		
	点検写真	点検写真	点検写真の撮影年月日を入力する。			半角数字		
	任意部分の断面写真	任意部分の断面写真	断面写真の任意部分の断面を任意した断面、断面に寸法を指定し出力する。			半角数字		
	トンネル断面写真	トンネル断面写真	断面写真の任意部分の断面を任意した断面、断面に寸法を指定し出力する。			半角数字		
任意部分の断面写真	任意部分の断面写真	断面写真の任意部分の断面を任意した断面、断面に寸法を指定し出力する。			半角数字			
ビューア実行ファイル	ビューア実行ファイル	断面写真の任意部分の断面を任意した断面、断面に寸法を指定し出力する。			半角数字			
構築物3次元データファイル	構築物3次元データファイル	断面写真の任意部分の断面を任意した断面、断面に寸法を指定し出力する。			半角数字			

5.4 点検データの活用

5.4.1 3次元形状モデルの詳細度

3次元形状モデルの詳細度を表 5-21 に示す。

表 5-21 3次元形状モデルの詳細度

	精細度100	精細度200	精細度300
概要	3Dモデル+撮りっ放し写真・損傷図のピン止め (写真のつなぎ合わせ不可)	3Dモデル+平面図郭近似モデル +各図郭への写真・損傷図の射影	3Dモデル+写真への座標値付与による 3D変状の生成と損傷図への反映
画像間の対応	画像同士のつなぎ合わせは不可	画像同士を貼り合わせられるが、表面形状を完全には再現できない。	画像のみで構造物の表面形状を再現できる
画像と3次元モデルの対応	画像内の1点を3次元モデルに対応付けられる	画像の4隅の位置を3次元モデル内で指定できる 画像内の位置特定はできない	画像内1ピクセル単位で3次元モデル内の位置を特定できる

【精細度 300】3次元モデル 3次元変状 写真 損傷図の相互連携イメージ
変状写真と損傷図と3次元モデルと3次元変状（きず等の変状オブジェクト）の4つを相互リンクするよう規定することで、3次元モデル上の変状から写真や損傷図を表示したり、損傷図から3次元モデルや写真呼び出しを可能とする。

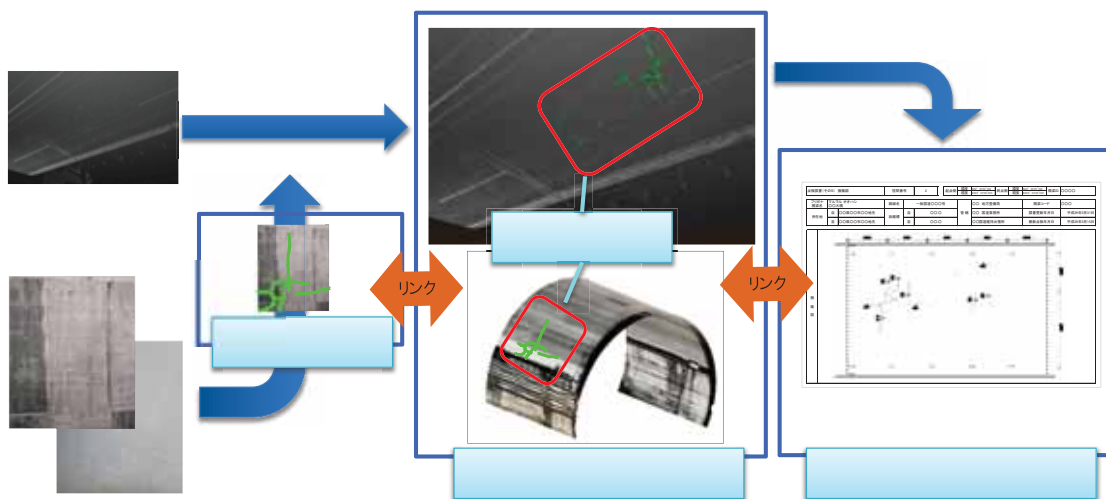


図 5-3 相互連携イメージ

5.4.2 損傷と3次元モデルの関連付け・表示

3次元形状モデルに対し、3次元変状モデル作成し、3次元点群上で形状及び変状を表現している。さらに変状に対して、既存の点検様式及び新技術で取得した画像を関連づけ、3次元データ上での新技術データと既存データの統合管理についてプロトタイプを構築し表現した。

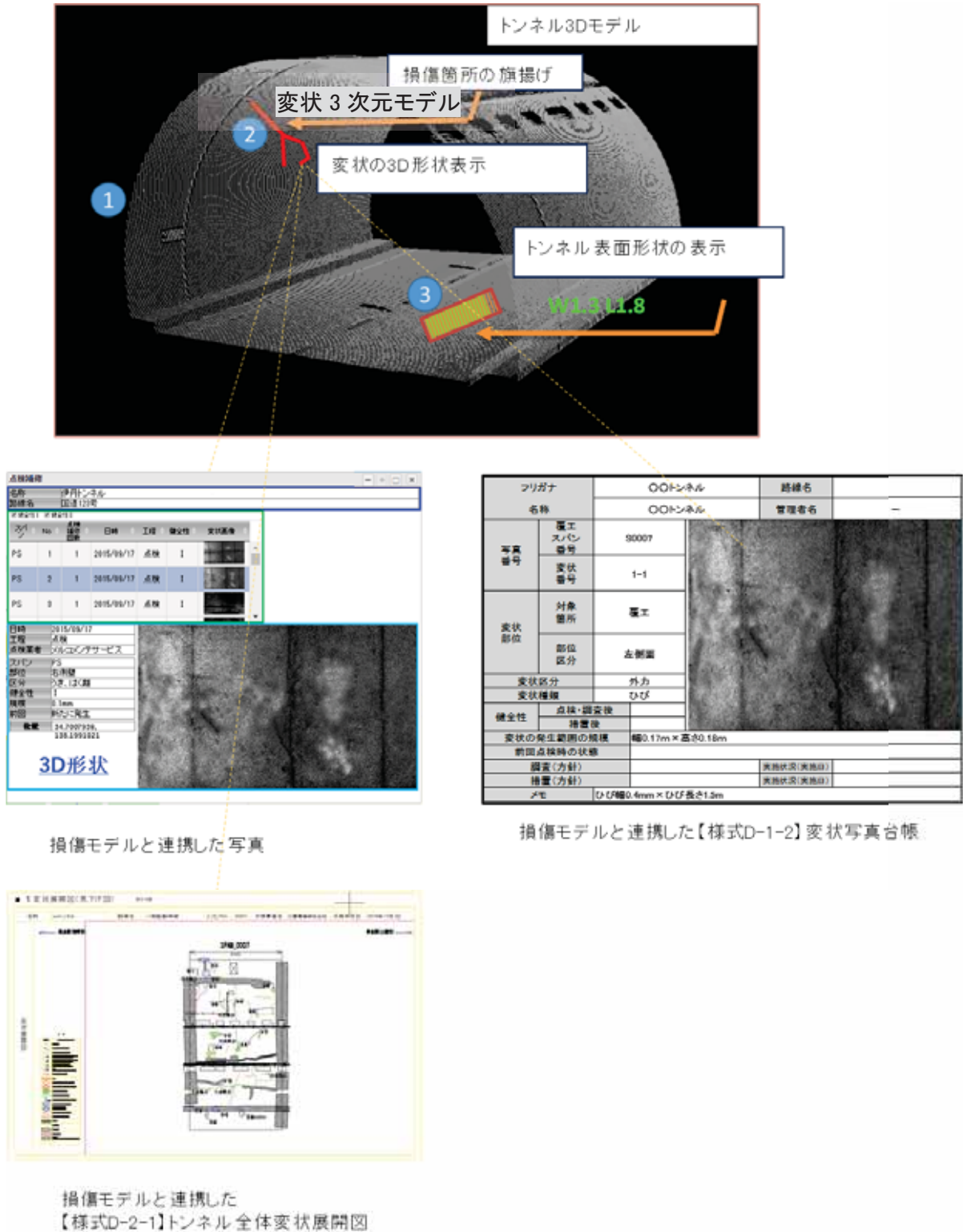


図 5-4 損傷と3次元モデルの関連付け・表示

5.4.3 点検結果表示

点検データの出力による効果と、出力イメージを以下に記す。

(1) 管理対象施設の効率的な把握

3次元モデルでの管理対象施設の確認を可能とすることで、施設の状況・状態の概要を把握できる。メタデータ内の情報により、異種のデータを重畳し、状況・状態の把握を効率化できる。

【例1】変状3次元形状データと点検写真の相互連携表示

過年度点検結果も含め、健全性判定結果を年度別およびスパン別に可視化する。各スパンにおいては、トンネル3次元モデル上に変状形状をマッピングし、対象箇所の詳細画像との相互参照を可能とする。

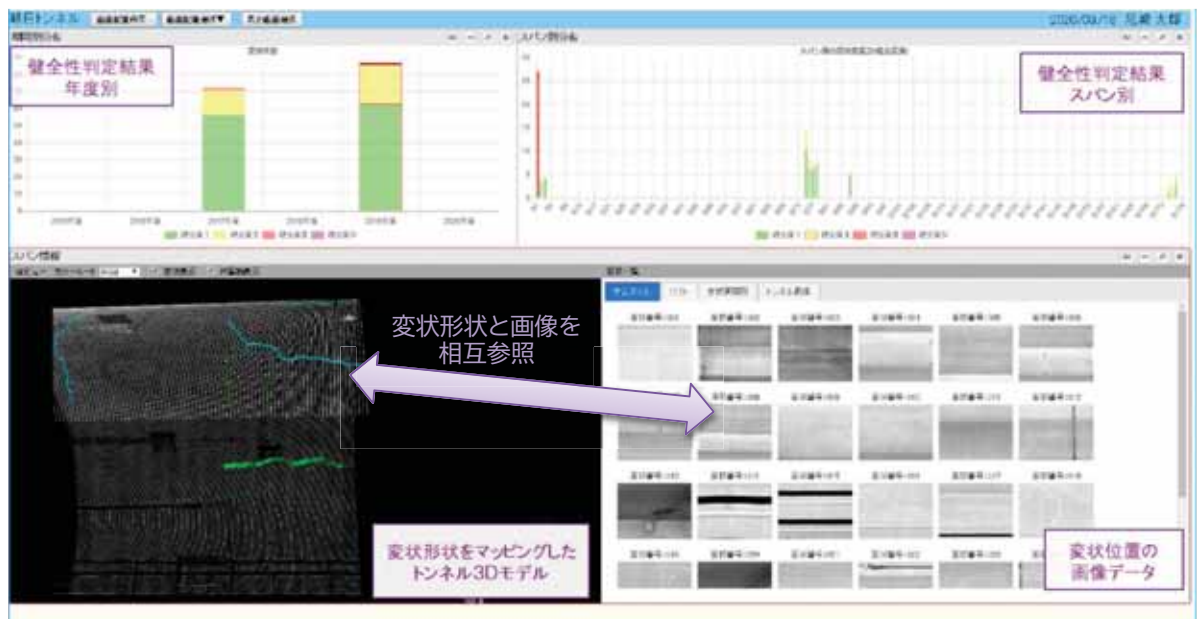


図 5-5 変状3次元形状データと点検写真の相互連携表示

【例2】変状形状データと展開画像の相互連携表示

トンネル3次元モデル上の変状形状を選択することにより、当該スパン全体の展開画像を表示し、変状位置の把握を支援する。(図5-6)

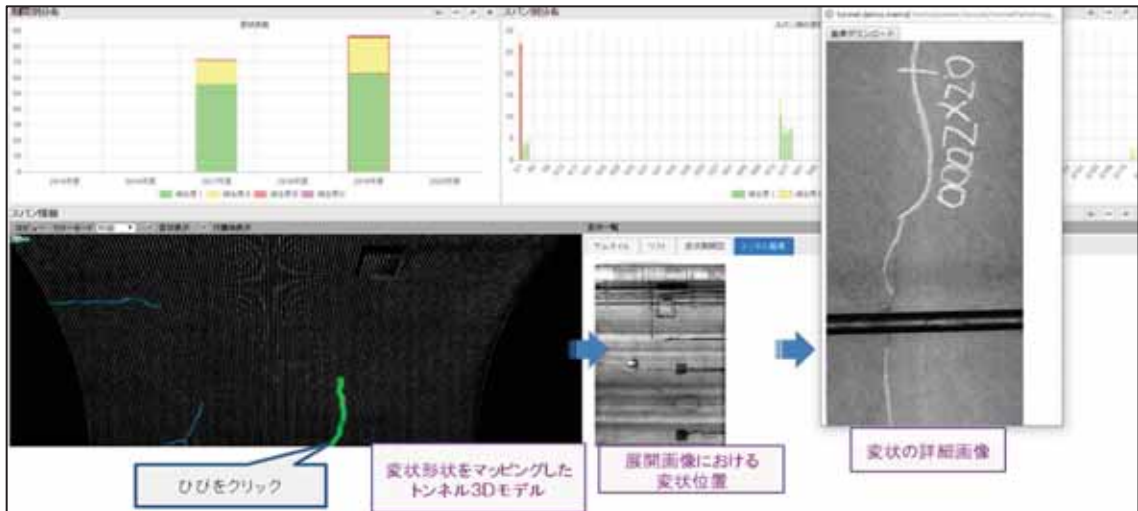


図 5-6 変状形状データと展開画像の相互連携表示

5.4.4 補修履歴データ表示

施設形状データのみにとどまらず、点検、補修等のデータを時系列で管理することによって、点検～診断～補修～更新といった維持管理の各段階において適切な措置が行えることが期待される。

【例】過年度点検結果との比較

過年度点検結果（変状展開図などの点検帳票）を併せて表示し、3次元モデルと見比べることで変状の経年変化確認を支援する（図 5-7）。

3次元の変状形状データが2時期分以上蓄積された際には、3次元モデル上での2時期の変状の重畳表示をすることで、更に経年比較が容易となる。

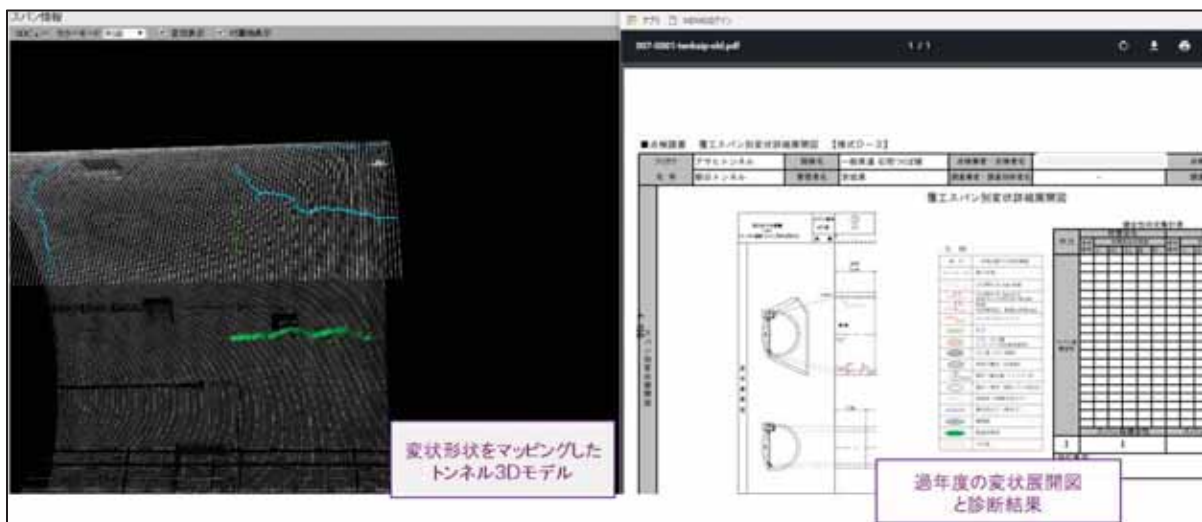


図 5-7 履歴管理による措置の適正化

5.4.5 他システムへのデータ提供

点検データを，構造物・設備単位等，適切なデータ管理で蓄積できれば，他システムへのデータ提供が可能となる．他システムへのデータ提供により，地図データとの重畳表示や，将来的には交通データのような動的データとも連携可能となる．

5.5 点検データの正規化

5.5.1 正規化と関連性

新技術を適用した場合の納品データ，帳票様式データを正規化した場合の点検データの関連について，図 5-8 に示す．

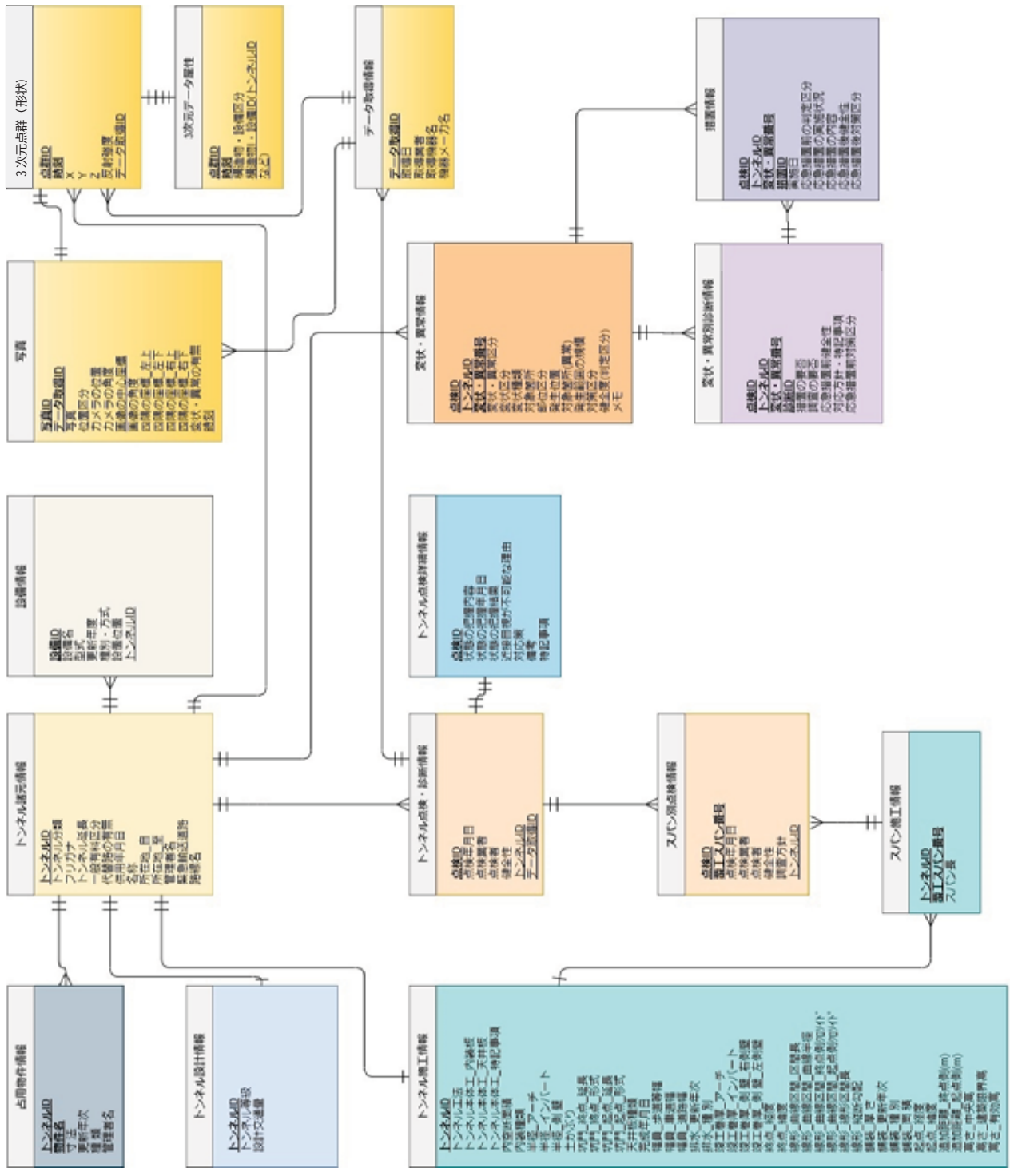


図 5-8 点検データ項目の正規化

5.5.2 正規化に伴い期待される効果

点検データの正規化に伴う効果は、以下が期待できる。

【点検作業負荷に関するもの】

①記載項目の重複⇒項目の一元化

データ項目の重複をなくし、登録・更新対象のデータ項目の一元管理が可能である。

②新技術との親和性向上

走行型計測、ドローン計測等新技術で取得されたデータによる登録・更新の際の変換の手間を極小化。

③点検以外（設計、施工時）の情報の記入⇒工程間のデータ共有

設計や施工等の前工程の情報を点検でも活用可能とする。

【点検精度に関するもの】

④記載誤りの混入⇒記載誤りの防止

情報間の関連を明らかにし、制約を予め付与しておくことで、データの記入誤りを防止する。

⑤要対応箇所的位置記入のばらつきの抑制

構造物、変状等，“モノ”のデータに、測定データで取得した位置情報を付与し、存在する箇所を特定可能にする。

⑥参考情報の精度⇒精度の改善

実際の構造物の測定値を利用する。

【その他】

⑦各様式間の関係⇒様式と図面の廃止

図面内，様式の記入内容を構造データ化し，様式・図面に関するデータは管理対象外とする。

加えて，適切なキー項目を設定することで，情報間の関連性を明らかにする。

参考文献

- 1) 道路トンネル定期点検要領，国土交通省，平成31年3月
- 2) 道路トンネル点検記録様式，国土交通省
- 3) 点検支援技術（画像計測技術）を用いた3次元成果品納品マニュアル【トンネル編】（案），国土交通省，令和3年3月

6 まとめ

本報告では、トンネル点検手法検討、トンネル点検・診断新技術検討、トンネル点検データ格納検討に関する共同研究成果をまとめたものである。

本共同研究では、点検支援技術の今後の活用に向け、以下を提示することができた。

1) トンネル点検手法検討（点検ロボット）

- 点検ロボットを活用することで、点検の効率化、省力化を図ることができ、客観的な状態の把握が可能となり、最終的に人力により診断する際に適切な情報を提供することができる。
- 画像の他に、レーザ、レーダなど他の計測手法を総合的に活用することが有効である。
- 茨城県の3トンネルにて現場検証を行った結果、提案する2手法の有効性が確認された。

2) トンネル点検・診断新技術検討（点検・診断AI）

- AI支援により、画像に基づくひび割れなどの変状抽出の有効性を検討した。
- 点検AIを支援技術として活用する場面（活用シーン）を提案した。
- 点検AIを開発推進するうえで必要となる学習用データの仕様を提案した。
- 共同研究者により、ひびわれの推論を中心とした変状抽出を支援する点検AIを開発した。
- 開発された点検AIの性能評価手法を提案し、共同研究者にて研究開発された点検AIの評価検証を実施、概ね活用シーンに応じて支援技術として実務レベルで適用可能であることを確認した。
- 健全性診断においては外力性の判定が重要であり、外力性診断AIを開発し、適用性を検討した。

3) トンネル点検データ格納検討

- 現在の点検要領に基づき、格納すべきデータの要件定義を行った。
- 茨城県へのヒアリングを踏まえ、望ましいデータ管理のあり方を検討した。
- 求められる点検データ管理システムの要件を検討した。
- 3次元モデルの活用が有効であることを提案した。
- 管理者に必要とされるデータ表示について検討した。
- データ正規化の有効性を示した。

今後、現場では、走行型計測の普及、ドローン技術等新技術が適用されていく。一方で、道路トンネル定期点検要領¹⁾に基づき、点検結果は納品され既存のシステムに登録されている診断結果も活用していく必要がある。そのため、これまでの点検要領に基づき、登録されたデータと新技術により取得されるデータが相互に関連付けられながら管理するしくみが必要である。今後、3次元データ、高解像度画像データの活用が進み、デジタルデータを主体とした管理が進んでいく。今回の研究では、既存データと新技術データ

相互を連携し、3次元仮想空間上でのデータ管理までを技術的に実現できることを実証した。さらにAIでのひびわれ抽出を含め、AIを活用した点検運用へと進んでいくため、その基盤となりうるシステム要件が明確になり、今後のシステム開発、サービスへの展開が期待できる。

参考文献

- 1) 道路トンネル定期点検要領，国土交通省，平成31年3月

謝辞

本共同研究を進めるにあたり、点検ロボットによるトンネル現場検証に関して、茨城県から検証場所の提供、国土交通省公共事業企画調整課より点検 AI に関する学習用データ等、点検 AI 評価等提供をいただきました。この場をかりて御礼申し上げます。

執筆者

土木研究所 技術推進本部 先端技術チーム	森川 博邦
土木研究所 技術推進本部 先端技術チーム	茂木 正晴
土木研究所 技術推進本部 先端技術チーム	二宮 建
パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通基盤事業本部	安田 亨
パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通基盤事業本部	田近 宏則
インフラマネジメント部 トンネル室	
パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通基盤事業本部	重田 佳幸
インフラマネジメント部 トンネル室	
パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通基盤事業本部	山本 秀樹
インフラマネジメント部 トンネル室	
パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通基盤事業本部	前田 洸樹
インフラマネジメント部 トンネル室	
パシフィックコンサルタンツ株式会社 デジタルサービス事業本部 情報事業部	川城 研吾
パシフィックコンサルタンツ株式会社 デジタルサービス事業本部 情報事業部 インフラデジタル推進室	榎本 真美
三菱電機神戸製作所社会システムソリューション部計画課	中田 雅文
三菱電機神戸製作所社会システムソリューション部技術第一課	眞鍋 七海
三菱電機神戸製作所社会システムソリューション部技術第一課	渡邊 光雄

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No.565-3 June 2022

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754