

新都市社会技術融合創造研究会

●研究テーマ

トンネル点検支援技術の高度化に関する研究

プロジェクトリーダー

日本工業大学 機械工学科 准教授

石川 貴一郎

研究概要

目的

非破壊検査技術に代表されるトンネル走行型計測の効果的な支援技術を、いかに高度化して、健全性診断に活用し、かつ社会実装化に向けて、より有用な道路トンネルマネジメント手法を確立すること。



診断結果の精度向上を目指し、点検支援技術として非常に効果的であることを実証

変状原因の外力・材料劣化、進行性の評価法の確立とマニュアル化

活用範囲、精度、運用方法の明確化

支援技術によるスクリーニングにより打音・触診箇所の明確化

点群データから得られる正確な3次元形状データ活用方法の明確化

現状で直面する課題に対する改善策として結果を取りまとめ、さらに飛躍した合理的かつ効率的なトンネルマネジメントを実施していくことを目的とする。

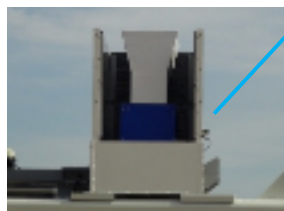
トンネル定期点検の支援システム 走行型計測

高密度レーザ (100万点/秒)



覆工の3次元形状計測

非接触空洞探索レーダ



TYPE1: 巻厚と背面空洞

非接触内部欠陥探索レーダ



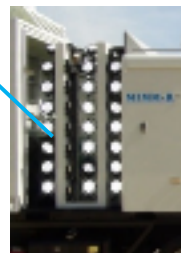
TYPE2: 内部欠陥、ジャンカ

標準MMS: レーザ



道路周辺の3次元地形測量

全周20台ビデオカメラ



ひび割れ、変状を連続撮影

時速50～70km/hで走行しながら計測



画像 (カメラ)



レーザ



レーダ

アンテナと壁面離隔: 3m

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、省力化などの支援を目指す。

研究概要

概要

(1) 研究名称: トンネル点検支援技術の高度化に関する研究

(2) 研究項目:

研究の内容	単位	数量
非破壊検査技術によるトンネル点検支援技術の高度化	式	1
AI技術活用による健全度診断の効率化・判定精度の向上	式	1
トンネルデータベースの有効活用検討	式	1

(3) 研究期間: 2018年10月 1日～2021年3月31日 (3箇年)

(4) 発注者: 国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所

(5) 研究体制: 産学官メンバー (代表者: 石川貴一郎)

区分	名称	摘要
リーダー	石川貴一郎 日本工業大学	
オブザーバー	大西有三 京都大学名誉教授	
学	岡山大学大学院環境科学研究科 関西大学社会安全学部 早稲田大学理工学術院基幹理工学部	西山教授 小山准教授 天野教授
産	iシステムリサーチ (株)、(株) ウエスコ、(株) ウオールナット、 応用地質 (株)、(株) オリエンタルコンサルタンツ、計測検査 (株)、(株) 建設技術研究所、(株) 鴻池組、国際航業 (株)、 (株) ニュージェック、パシフィックコンサルタンツ (株)、三井 住友建設 (株)、三菱電機 (株)、ライカジオシステムズ (株)	
官	国土交通省近畿地方整備局道路部、近畿技術事務所、(一 般) 先端建設技術センター、(株) 高速道路総合技術研究所、 (一般) 日本建設機械施工協会、(一般) 近畿建設協会	

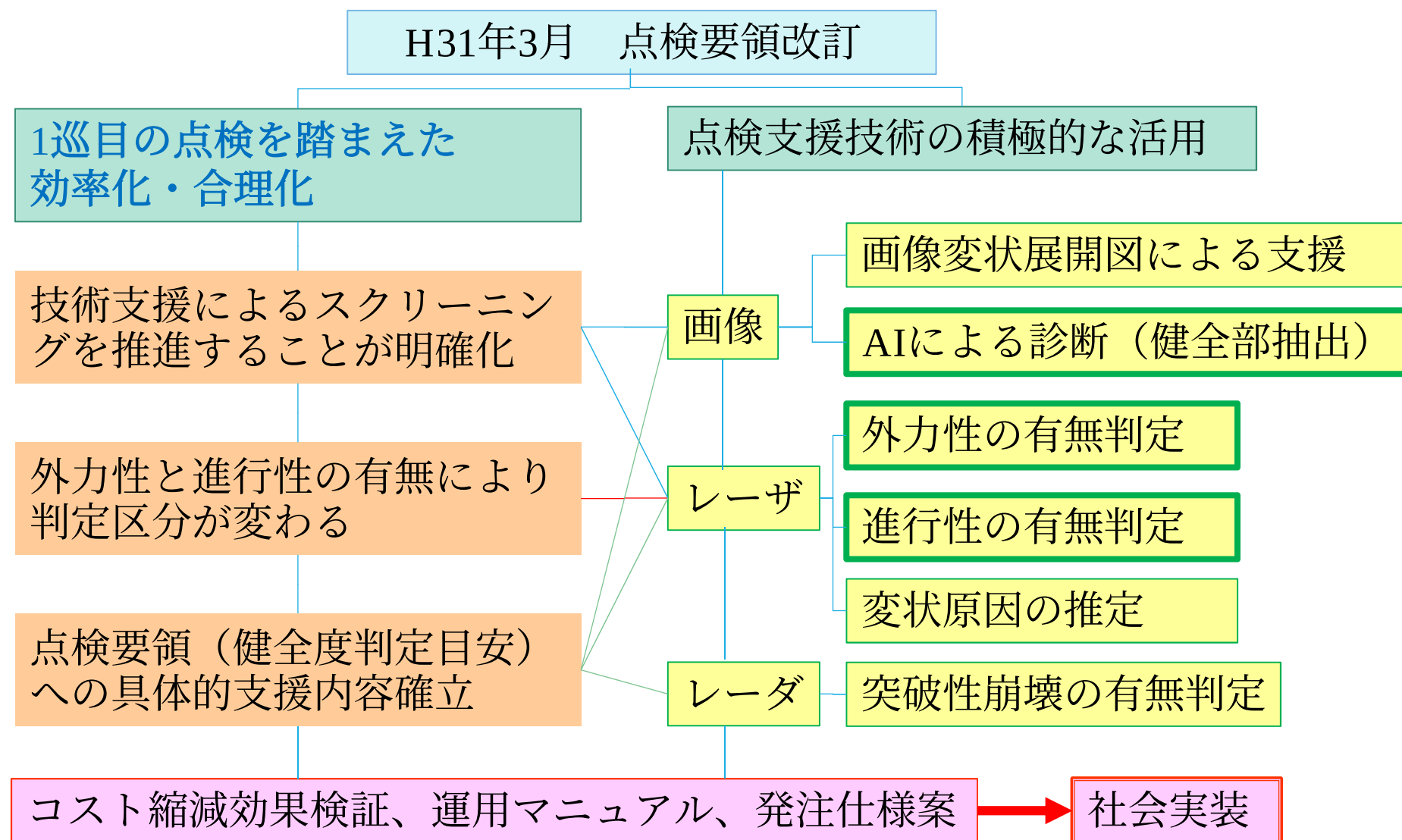
研究概要

研究内容

研究項目	目的	2018年度	2019年度	2020年度
①非破壊検査技術の有効活用によるトンネル点検支援技術の高度化	✓ 変状原因（外力or材質劣化、進行性）の評価法の確立とマニュアル化 ✓ 活用範囲、精度、運用方法の明確化	<u>支援技術の明確化</u> ・変状種別、精度 <u>検出精度向上検討</u> ・レーザ点群の特徴 ・点群からの特徴量の抽出 走行型計測機器の選別、計測方法、データ取得方法、解析方法、レーザ精度検証	<u>レーザ計測検出能力、精度検証</u> ・実トンネル実証試験・レーザ計測の課題 ・断面計測精度 ・速度による誤差精度 ・再現性検証	<u>レーザ計測検出能力、精度検証</u> ・実トンネル補足検証 ・レーザ計測評価法実装化検討 ・画像新技術の評価 ・うき検出検討 ・支援内容の検証・確立、施工時の活用 ・運用マニュアル ・コスト縮減、標準仕様
②画像・計測データへのAI技術活用による健全度診断の効率化・判定精度の向上	✓ 支援技術によるスクリーニングにより打音・触診箇所の明確化	<u>AI診断の効率化・精度向上検討</u> ・走行型計測の課題 ・トンネル構造物点群の抽出手法の試行 ↓ 課題の明確化	<u>AI診断の効率化・精度向上検討</u> ・入力ツールの開発 ・実トンネルにおける入力作業 AIによる健全部の診断、スクリーニング技術の開発	<u>適切な教師データによるAI学習</u> ・変状，展開図，判定をセットにして属性付与
③i-Construction推進に向けたトンネルDBの有効活用検討	✓ 点群データから得られる正確な3次元形状データ活用方法の明確化	<u>既設トンネルデータを用いた画像解析</u> ・計測の実施、解析 誤差を適正化した高度解析技術による変形評価法（位置情報・差分解析）	<u>位置推定手法の開発</u> ・スキャンマッチング活用における誤差分布	<u>レーザ計測検出能力、精度検証</u> ・正しい中心軸の決定 ・3次元計測の最適化検討（SLAM活用） ・位置情報の有効活用

非破壊検査の高度化に対する検討方針

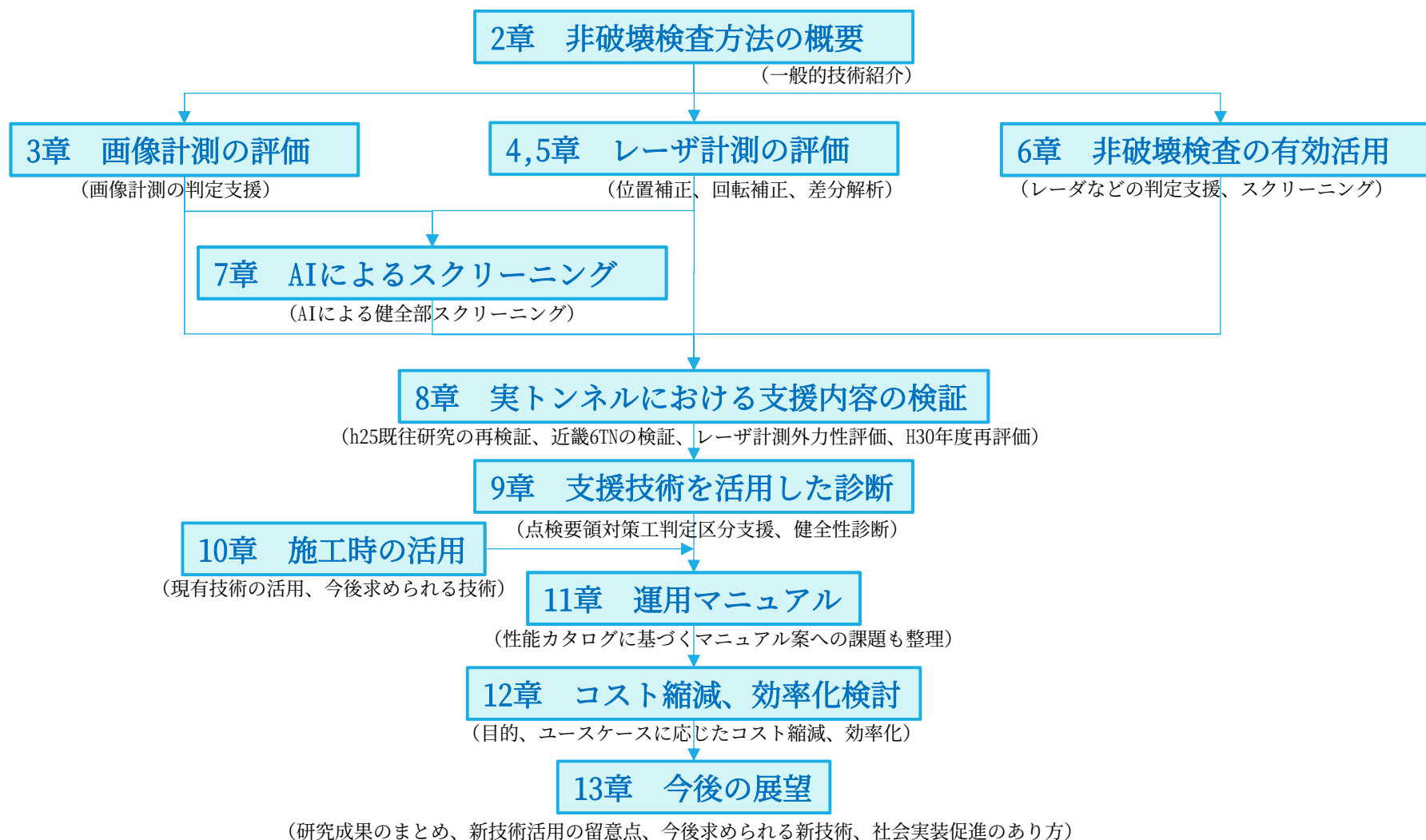
基本方針における研究のポイント



非破壊検査の高度化に対する検討方針

報告書構成

- ・ 報告書構成、各章間の関係性は以下のとおりである。



非破壊検査方法の概要

性能カタログ等の技術情報の収集

- ・性能カタログに加え、NETIS登録技術や、今回の新都市PJ参加企業の点検支援技術など整理する。
- ・単独で活用するケース、組み合わせて活用するケースについては、変状の種類別に整理し、かつ要求性能も合わせて整理する事で、ユースケースと実務レベルにおける要求性能項目をとりまとめる。

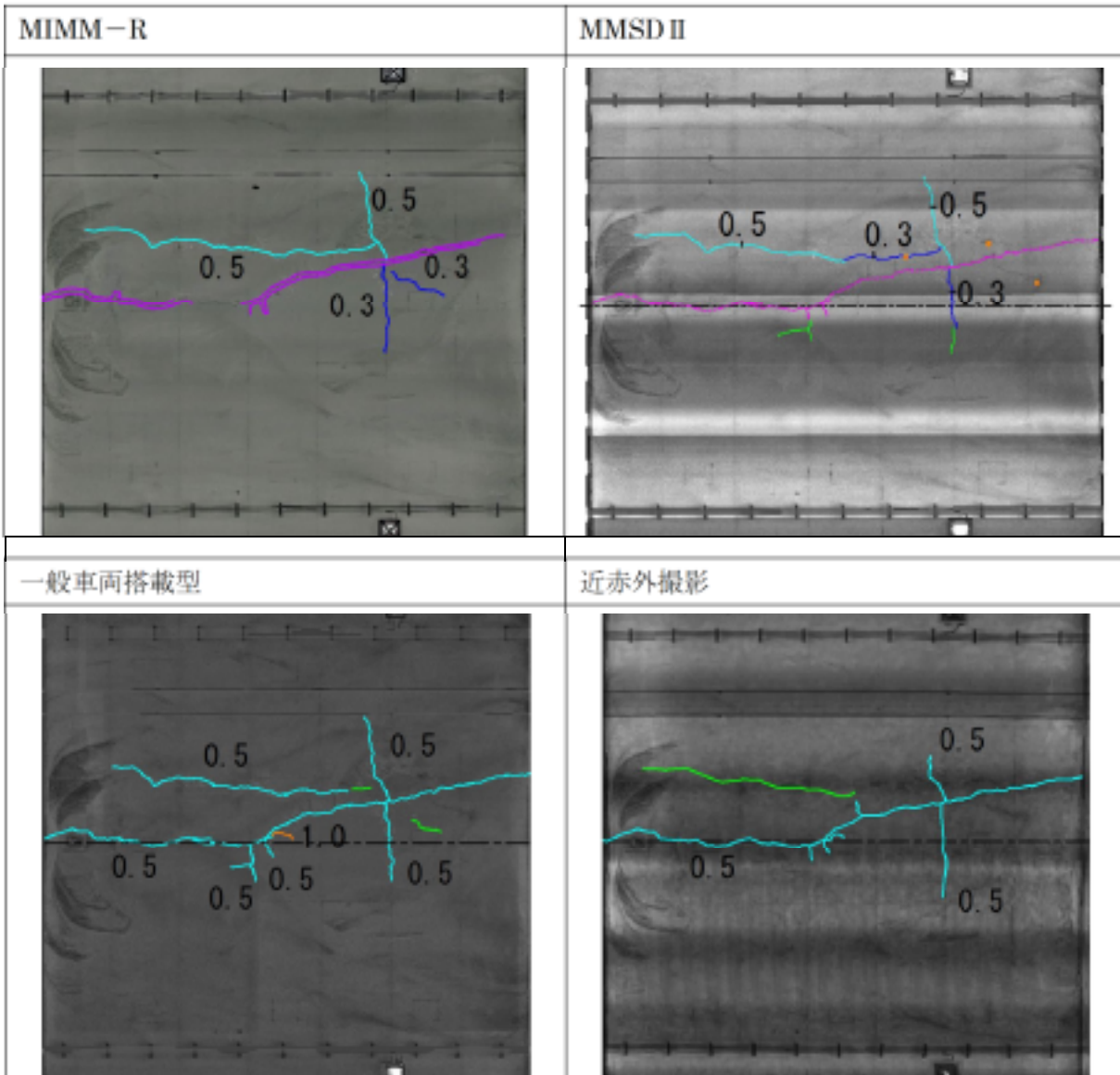
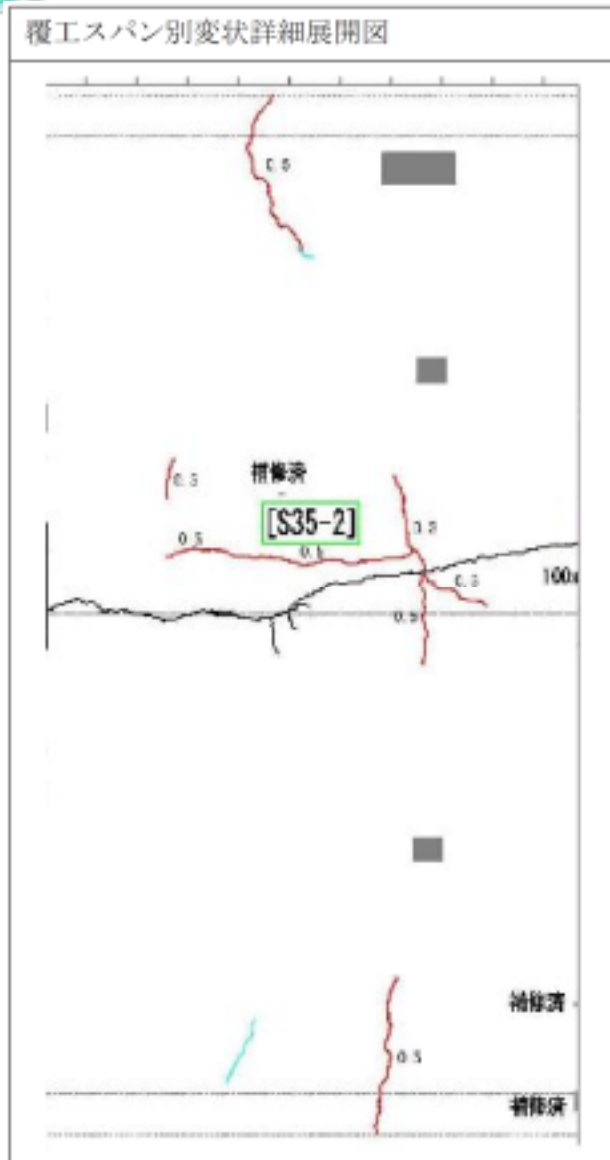
画像計測技術（11技術）	非破壊検査技術（9技術）	計測・モニタリング技術（5技術）
画像解析を用いたコンクリート構造物のひび割れ定量評価技術	デジタル打音検査とデジタル目視点検の統合システム	OSVを活用したトンネル附属物の監視技術
社会インフラ画像診断サービス「ひびみつけ」	道路性状測定車両イーグル（トンネル形状計測）	3軸加速度センサを用いた傾斜計による、トンネル内付属物（照明器具・標識等）の傾斜角度変位モニタリングシステム
走行型高精細画像計測システム トンネルトレーサー	レーザー打音検査装置	MIMM-Rのレーザースキャナを活用したトンネル内装板背面の覆工変状の監視技術
一般車両搭載型トンネル点検システム	天秤方式移動型レーダ探査技術	走行型レーザ計測によるトンネル覆工幅と高さの把握
トンネル覆工表面撮影システム	打音検査ユニット	ProScan
トンネル覆工点検システム eQドクターT	走行型高速3Dトンネル点検システム MIMM-Rレーダ探査技術ー	
道路性状測定車両イーグル L&Lシステム	ドローンレーダによる覆工探査技術	
社会インフラモニタリングシステムMMSD	トンネルマスター	
走行型高速3Dトンネル点検システムMIMM-R/MIMM	トンネルレーザ計測及び覆工巻厚・背面空洞レーダ探査システム	
3Dトンネルレーザー計測システム		
走行型近赤外線撮影によるSfM三次元画像解析システム		



本研究での実証実験に使用

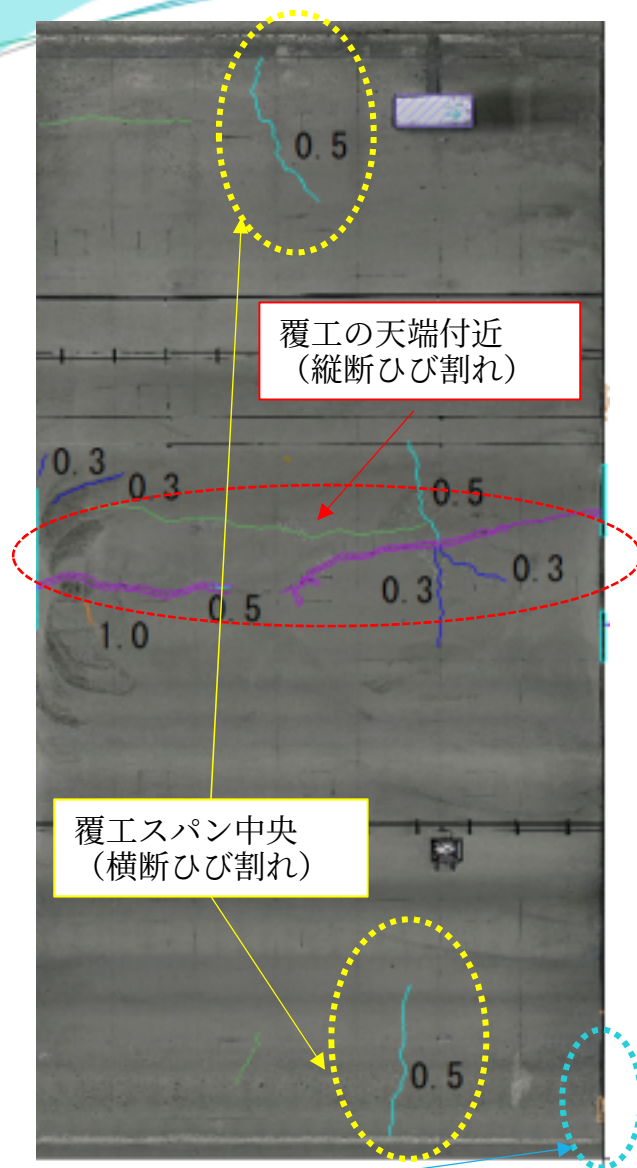
画像計測の評価

変状展開図 S035



4技術ともに、ひび割れの取得、展開図への反映ができています

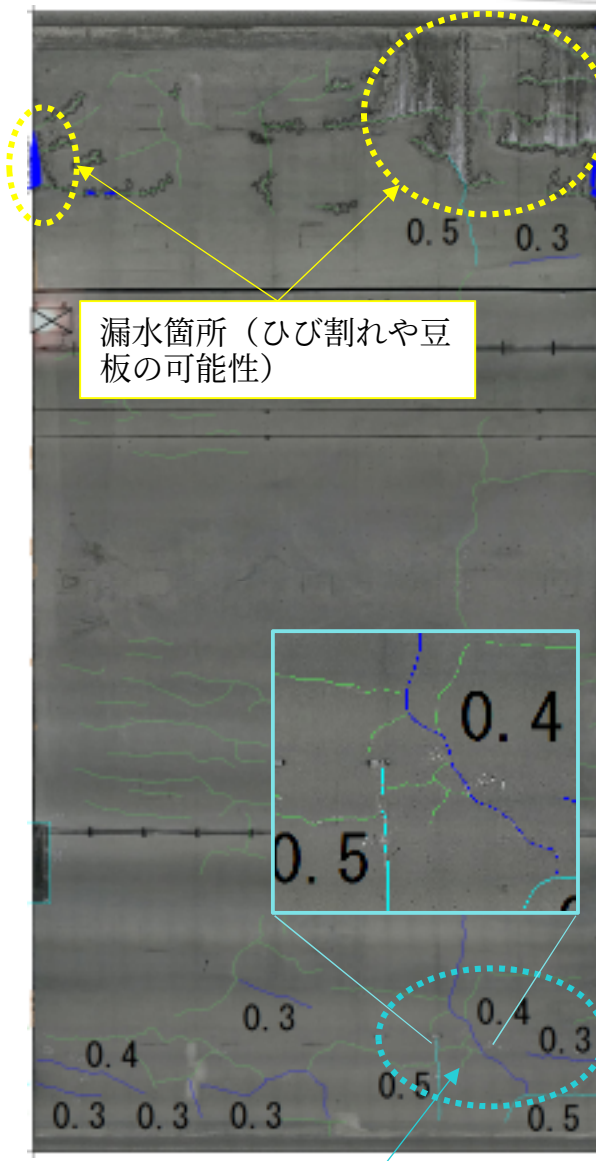
定期点検要領の着目点に対し画像計測でわかる変状



覆工の天端付近
(縦断ひび割れ)

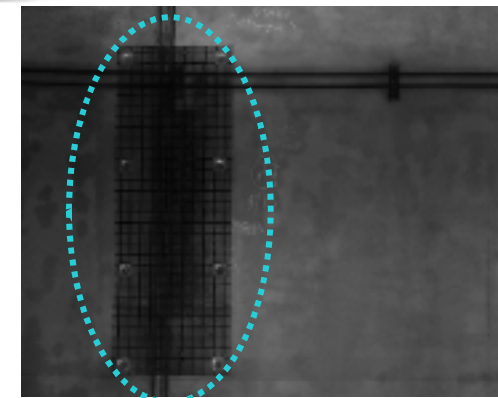
覆工スパン中央
(横断ひび割れ)

覆工の目地 (横断目地の
半月状のひび割れ)

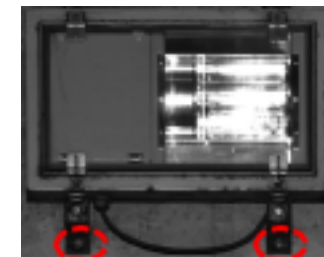


漏水箇所 (ひび割れや豆
板の可能性)

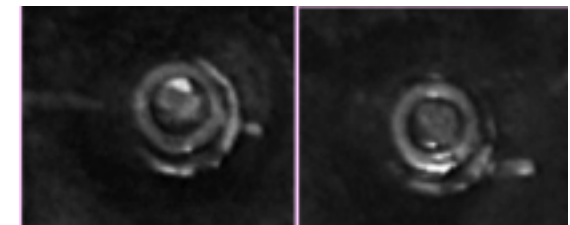
ひび割れのブロック化
(うき・はく離の可能性)



補修箇所 (ボルトの脱落、補修材の
うきの可能性)



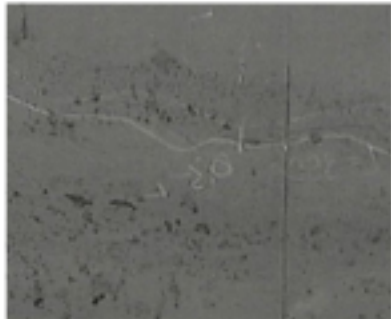
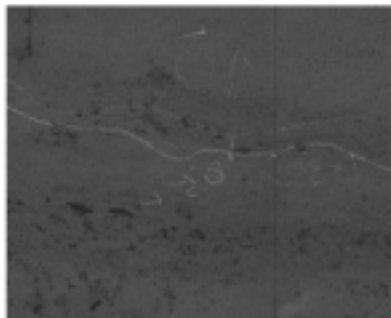
付属物 (アンカー
ボルトの脱落、
ケーブルのたる
み可能性)



合いマークを確認

画像計測による個別変状の評価

S046

個別変状の評価		近接点検写真	MIMM-R	MMSD II
ひび割れ	0.3mm以上のひび割れを抽出している。さらに0.3mm以下の微細なひび割れも抽出している。 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。			
漏水	漏水箇所及び遊離石灰箇所が確認できる。	変状の内容		
付属物	照明灯具、ケーブル、誘導表示板が確認できる。 また、補修工のFRPネットも確認できる。	一般車両搭載型		
		近赤外撮影		
		変状部位 覆工右アーチ部 変状区分 外力 ひび割れ 発生範囲 幅 0.5mm 対策区分 II b		
従来のスケッチと比較し、正確に変状位置を把握できる。		評価	・ 4技術ともに、ひび割れ幅と長さを確認可能 ・ ひび割れについては、II b 以上の変状はすべて確認可能 ・ 漏水については、量の把握は困難であるが、位置と範囲については、I 判定もすべて確認可能	
汎用化：画像データの互換性は確保されている。		課題	・ うきについては、検出できない。（予測は可能） ・ ひび割れは、外力か、材質劣化によるものか、画像のみでの判断は困難。 ・ 覆工の段差箇所は検出できない。 ・ 漏水の量は検出できない。	

4. 位置情報の有効活用

【研究項目②】回転補正、縦断方向の位置補正の実用化検討

レーザー位置精度に影響を与える要因と対策

- ・正しい軌跡
- ・誤差を持つ軌跡

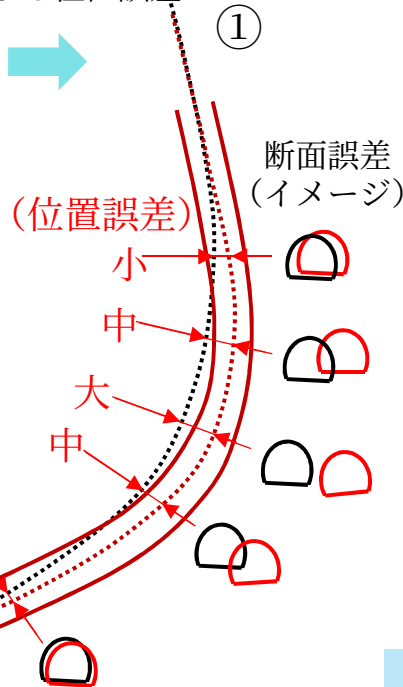
衛星可視下：①と②

- ・位置誤差が少ない（3cm～10cm程度）
- ・姿勢誤差は殆どない

衛星不可視下（トンネル内）

- ・トンネルの中心部分で誤差が一番大きい
- ・カーブで誤差が出やすい
- ・位置誤差と姿勢誤差（ロール方向を含む）が生じる
- ・進行方向に対して、位置のずれが生じる

位置推測誤差
による位置誤差



②

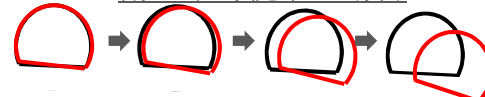
衛星不可視下の状態にて：
・位置の誤差が増加する
・姿勢の誤差が増加する

衛星可視下の場合



IMUのBiasが少ない、誤差も累積しない

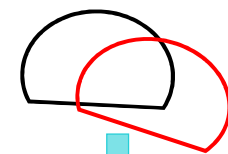
衛星不可視下の場合



IMUのBiasが増上し、誤差も累積する
大きな位置と姿勢誤差が発生する

時間

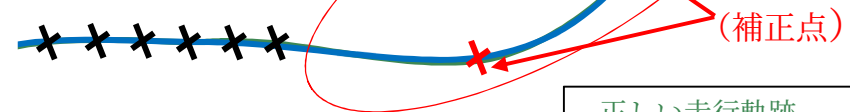
補正による位置と姿勢改善



走行軌跡位置・姿勢誤差に対する対策

衛星不可視内に、人工的に座標を与え補正：

- ・正確に測量した座標（絶対位置補正）
- ・トンネル固有座標（相対的補正）

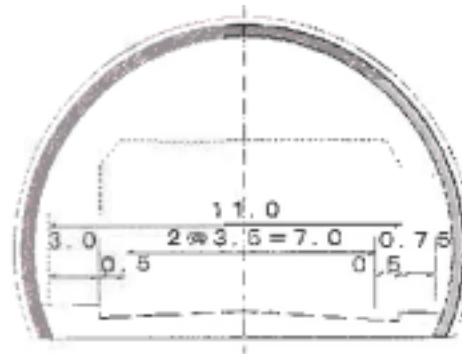


- 正しい走行軌跡
- 補正済み走行軌跡
- 衛星による位置情報
- 補正点

- 20秒の進行に対し1つの補正点を与え、絶対位置誤差を改善する
- 補正により姿勢情報（ロールなど）が改善するが、完全補正は困難
- 回転補正が今度のトンネル変形評価の課題となる

実トンネルにおける検証実験

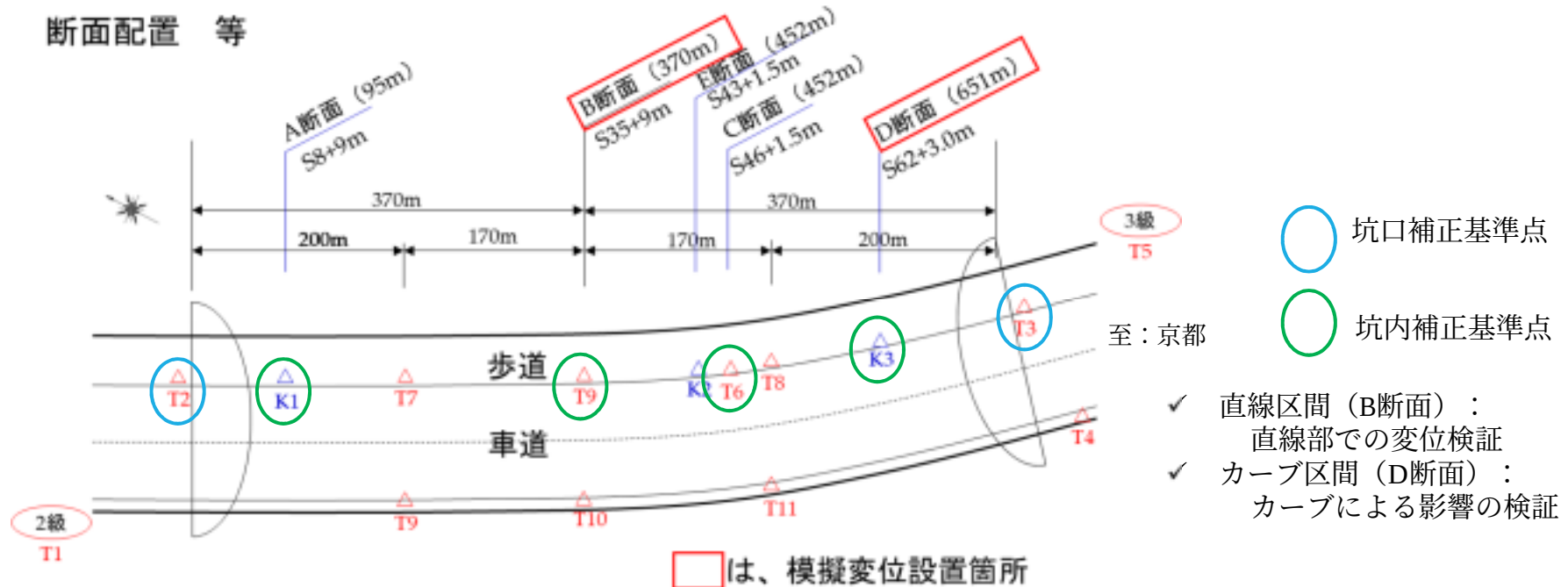
- 名称：トンネルA
竣工：平成10年
- 延長：740.0m
- 施工法：NATM



トンネル部

- 2013年度 定期点検 (MIMM計測)
- 2017年度 定期点検 (MIMM計測)
- 2019年度 検証試験 (MIMM計測)

断面配置 等



実トンネルにおける検証実験 比較対象機種

Reference



Leica ScanStation
P40
基準点より3D測量



R1年度



MIMM 90°

Test Case



Pegasus II 40°



MIMM+OS1
SLAM スキャンマッチング

R2年度

MIMM+SLAMでの精度検証



MIMM-R



Pegasus II 90°



MIMM-R+OS1



MMS-D



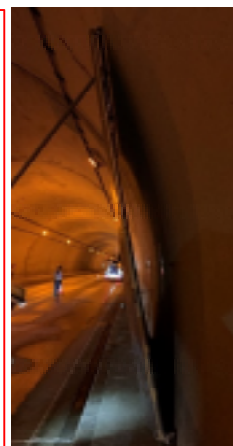
MIMM-S Z+F



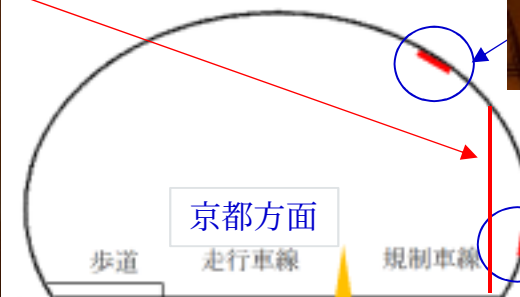
計測状況

画像計測の検証も実施する。
(一般車両搭載、近赤外、MMS-D)

広範囲な変形を評価する
目的でシートを設置する。
(B断面近傍に単管パイプを立て掛け
上部をアンカーで固定)



模擬変位の概要

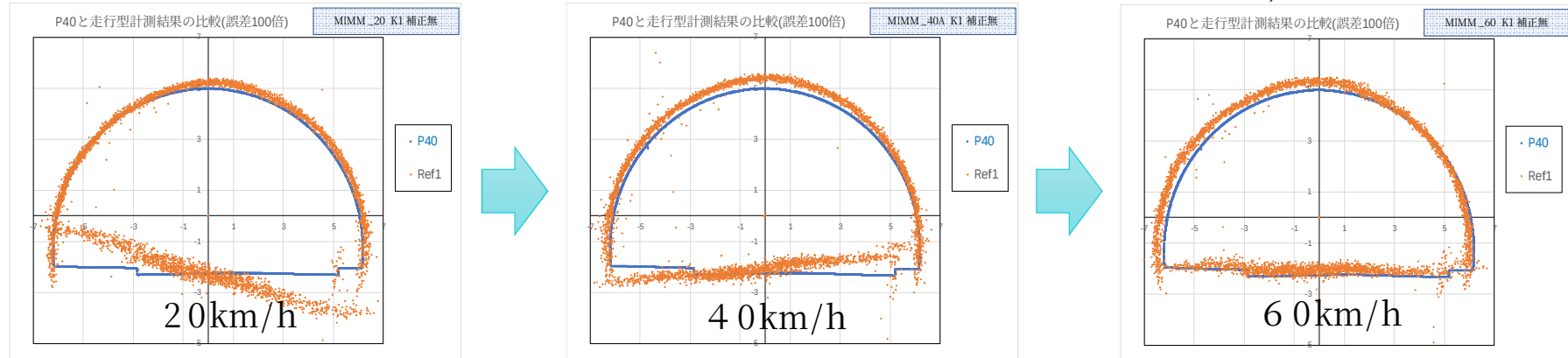


合板サイズ：
180×90（アンカー
固定）
50×50、20×100、
20×20
厚さ：10～15mm

レーザによる断面計測および縦断位置精度

速度の違いによる断面計測精度

- ・ P40と計測結果との比較例（各計測点の誤差を100倍に拡大して表示）



速度差による誤差の比較（MIMM、K1地点補正なし）

計測機器	計測速度	誤差算出結果				
		高さ誤差 (m)	幅誤差 (m)	40度地点 誤差 (m)	135度地点 誤差 (m)	路面回転 誤差 (度)
MIMM	20km/h	0.0028	-0.0017	-0.0003	-0.0017	-0.1252
	40km/h A	-0.0026	-0.0001	-0.0026	-0.0022	0.0671
	40km/h B	-0.0016	0.00245	-0.0053	-0.0030	0.0484
	60km/h	0.0005	-0.0018	-0.0029	-0.0002	0.0058

誤差小

速度が上がるにつれ、誤差、回転誤差が小さくなる傾向を確認
 （理由：GNSS不可視時間が短くなり、ジャイロの累積誤差が減少するため。）
 計測速度は40km/h以上が望ましい

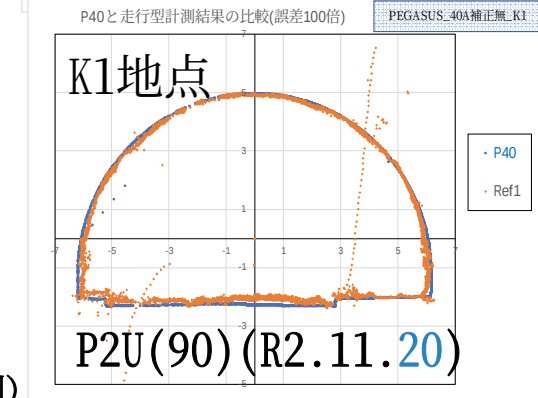
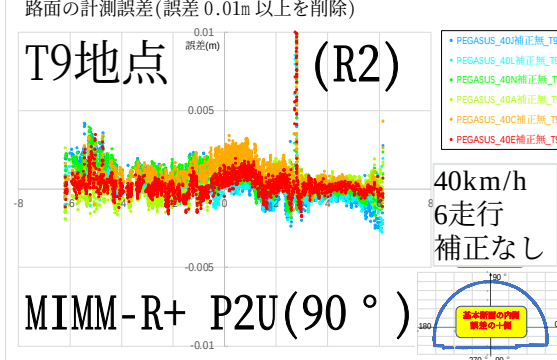
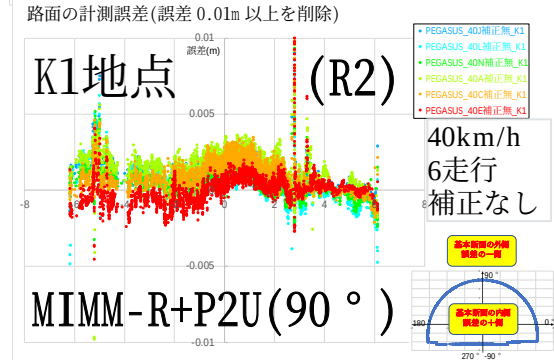
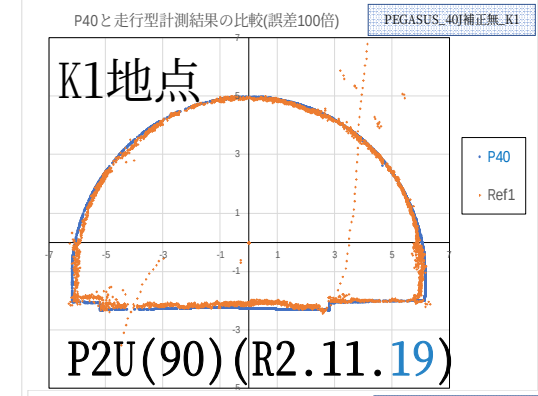
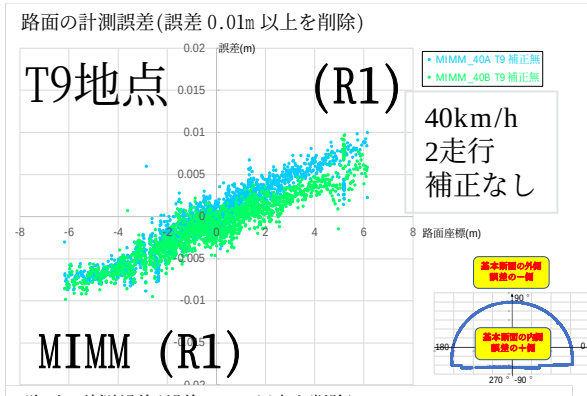
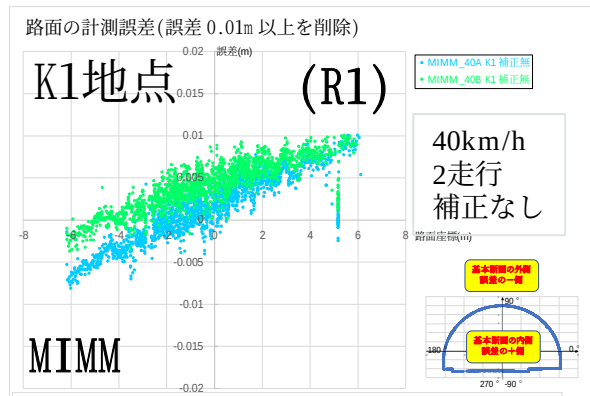
レーザによる断面計測および縦断位置精度再現性の検討

1) 再現性の検討(計測時期が異なる場合の再現性)

- 各計測装置の誤差傾向は類似
- 衛星受信状態によっては誤差量(回転誤差)は変動

路面の計測誤差

(各計測点の誤差を100倍に拡大して表示)

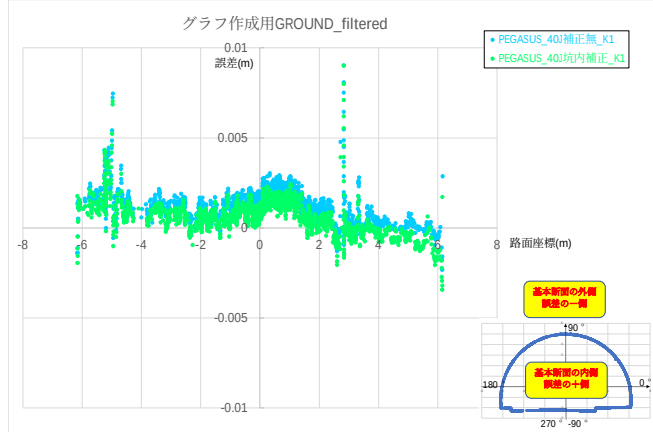


同一速度による誤差比較 (P40と計測結果との比較例)

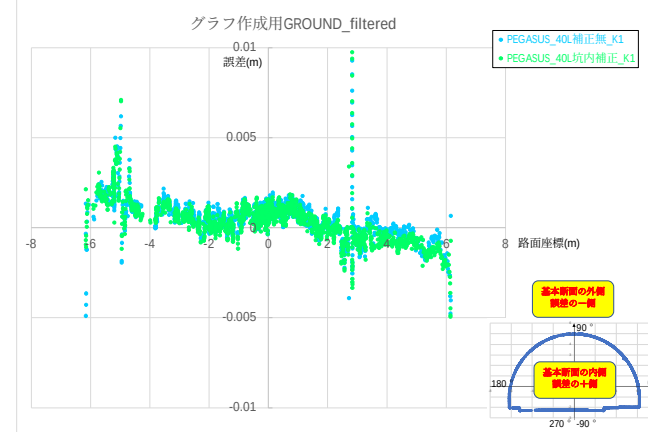
計測誤差(別装置+別年度、別計測日)の再現性は高い
 回転誤差を修正すれば異なる計測装置でも比較可能(データ互換性確保)
 計測方向、計測速度を合わせる、良好な衛星受信状態の時間帯を選ぶことが重要
 (計測方向、計測速度、使用機器、補正の実施の有無等の記録を残しておく)

レーザによる断面計測および縦断位置精度 基準点による補正の検討 (坑口、坑内基準点補正)

1) 走行速度による誤差 (路面) P2U K1地点 (起点坑口から90m) R2



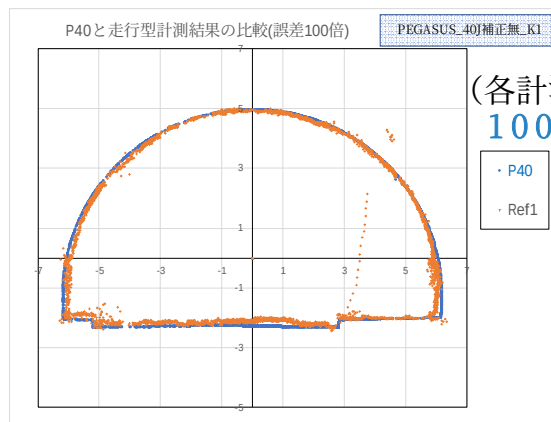
a) 計測速度40km/h J



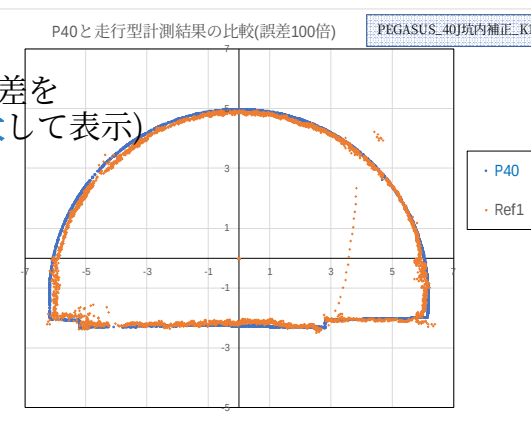
b) 計測速度40km/h L

凡 例

補正無し
坑口・坑内補正
縦軸：誤差
横軸：路面座標



a) 計測速度40km/h J



b) 計測速度40km/h L

(各計測点の誤差を
100倍に拡大して表示)

- ・ 両坑口と坑内に200m程度間隔で設置した補正点を用い、補正の有無について検討を行った。
- ・ 断面の回転については補正の有無で大きな差異は見られない結果となった。しかし、トンネル中心位置のずれやトンネル縦断方向の位置は補正より改善されることがわかった。

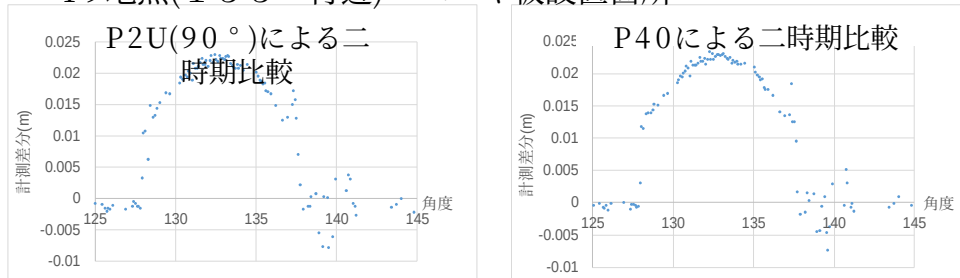
- ・ 基準点による補正を行えば、鉛直方向の計測誤差は減少傾向となる
- ・ 衛星不可視化時間が長いと、補正の効果は向上する傾向となる
- ・ 補正を行っても回転誤差は解消されない

位置補正及び二時期比較を行う上での留意点

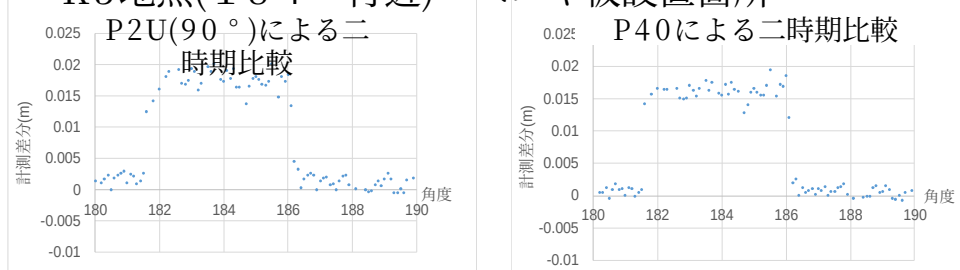
二時期比較

模擬変位箇所について、設置前後（R2.11.19とR2.11.20）の計測結果の差分を算出した。

- ・ T9地点(133° 付近) ベニヤ板設置箇所



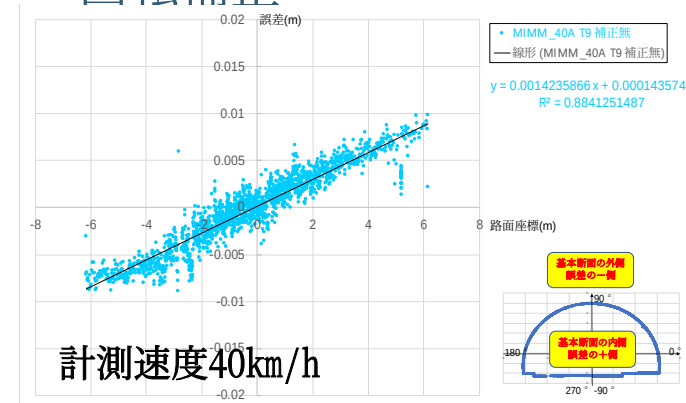
- ・ K3地点(184° 付近) ベニヤ板設置箇所



計測断面	角度	P2U(90度)差分	P40差分	誤差
K3地点	134° 付近	17.7mm	15.7mm	2.0mm
	184° 付近	17.9mm	16.3mm	1.6mm
T9地点	133° 付近	22.0mm	22.5mm	0.5mm
	184° 付近	17.8mm	18.3mm	0.5mm

誤差は0.5～2mm程度以内となり内空変形は評価できていると考えられる

回転補正



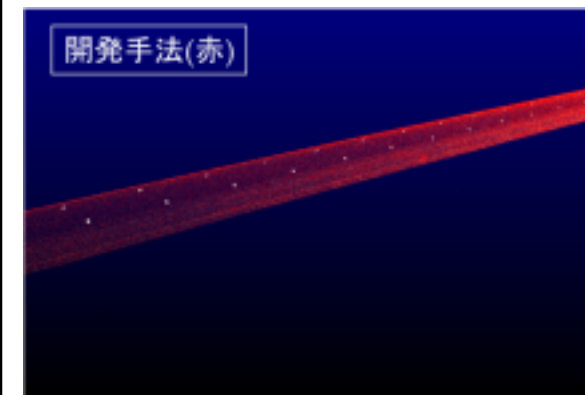
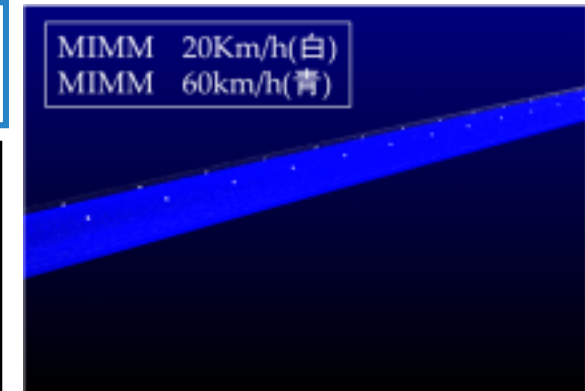
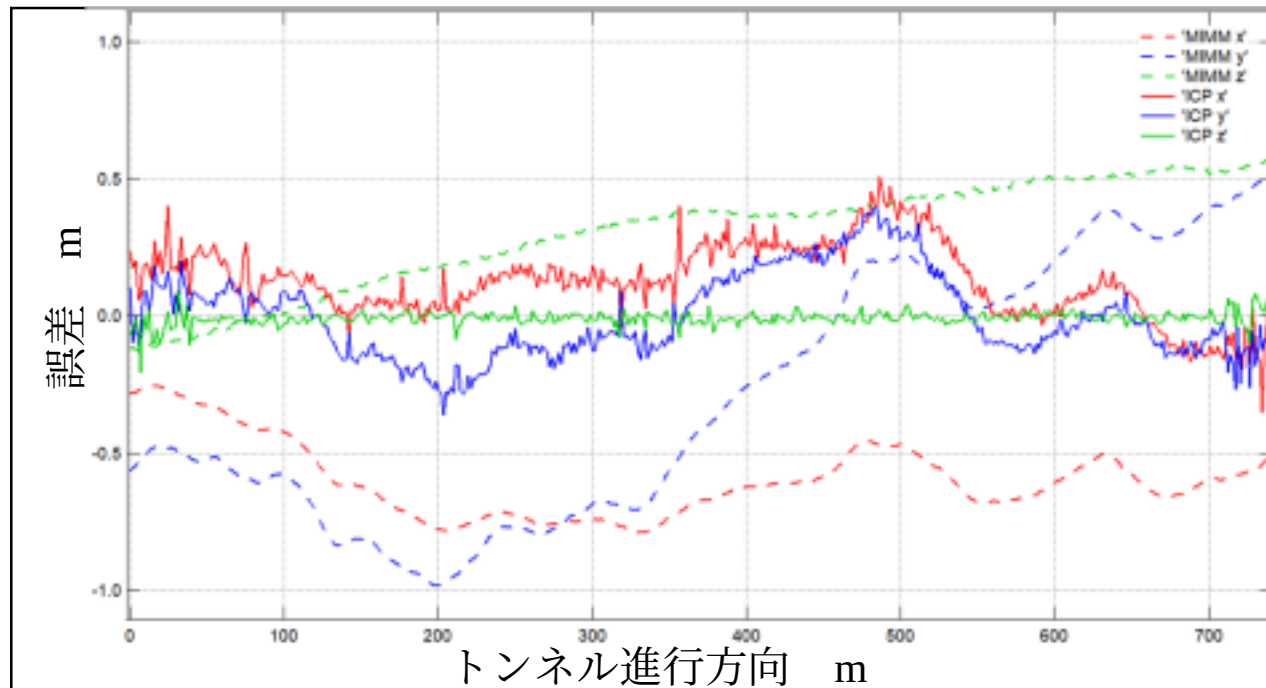
2時期の比較においてはその回転誤差を補正して比較を行う必要がある。
路面中心を基準にした回転補正方法を提案

レーザ計測のまとめ

- MMSの変位計測精度 ±2mm程度
- 1mm/年未満か1～3mm/年の判断は可能
- 複数回の計測により変位の進行性のトレンドを確認して評価することが望ましい。
- 外力による変状の評価や進行性の評価においては、コンター解析などにより面的な変形を確認することが重要であり、レーザー計測は有効な方法である。
- 凹凸の計測相対的な精度は1mm程度

トンネル照明位置比較によるICPスキャンマッチング 自己位置推定(2時期差分) 性能評価

スキャンマッチングでは累積誤差が見られない
照明の抽出精度，計測精度が影響している可能性大←精査が必要



MIMMによる走行1回目(時速20km)と，9回目(時速60km)を比較(点線)
MIMMによる走行1回目(時速20km)と，
OS-1点群(9回目走行時)を1回目点群へICPスキャンマッチングした結果(実線)

	X m(rms)	Y m(rms)	Z m(rms)	d m(rms)
GNSS/IMU	0.612	0.543	0.360	0.740
開発手法	0.183	0.153	0.027	0.214

高さ方向の精度が
著しく向上(5cm以下)

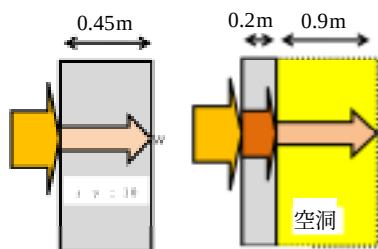
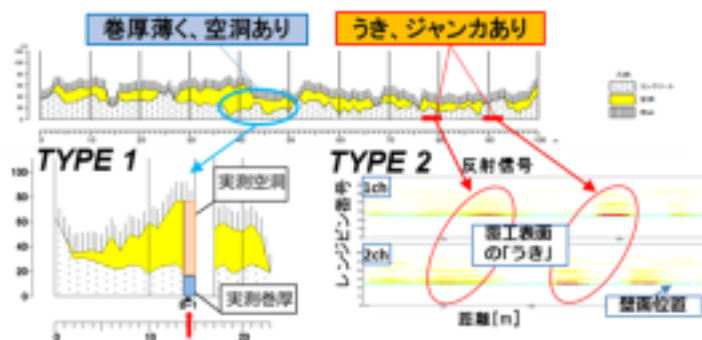
非破壊検査方法の有効活用概要

走行型非接触レーダ



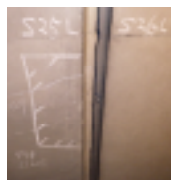
巻厚・空洞探索

内部欠陥（うき、ジャンカ）



覆工厚（最大45cm）+空洞厚の合計が1.0m程度まで検知可能

検出した「うき」



点検要領の判定の目安に対して支援できる内容

有効巻厚／設計巻厚

有効巻厚／設計巻厚	有効性	適用
1/2未満	○	設計巻厚0.9m未満の場合
1/2～2/3	△	設計巻厚0.7m未満は可能
2/3以上	×	巻厚45cm以上は不明

項目：突発性の崩壊



確認が可能な項目

覆工巻厚、空洞厚	有効性	適用
巻厚30cm未満かつ空洞30cm以上	○	検出可能
巻厚30cm以上かつ空洞30cm以上	△	覆工の厚さ45cmまで支援可能
空洞30cm未満	判定無し	〃



接触レーダを組合わせて支援

探査深度をカバー



天秤方式移動型レーダ探査技術
(性能カタログ登録技術)

【効果】

- 打音しなくても良い健全部を除外するスクリーニングには有効

【課題】

- 10cmサイズ以下のうきは検出できない
- 有効巻厚の検討は、強度がわからない以上、代替手法にはならない。ただし、表層劣化の変色、ジャンカ有無、断面欠損、目地部などの低品質材質劣化状況などを総合して支援する。

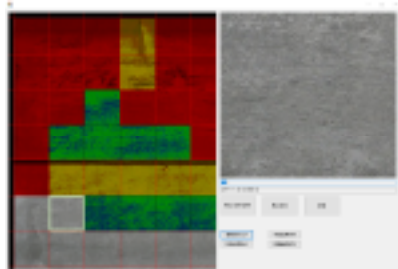
AIによるスクリーニング

目的

- 目視点検前のスクリーニングを目的とし、変状を発見するのではなく、正常な箇所を見つけ出すことにより、目視点検時に、打音検査不要な健全部を抽出する。
- 点検現場における負担軽減、作業効率化を目的とする。

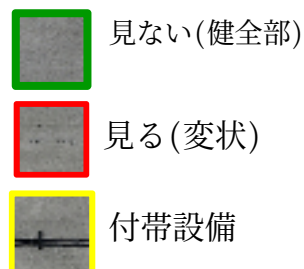
AI開発における課題

- ✓ AI開発には品質の良いデータが大量に必要
- ✓ 一般的な物体認識と異なり教師データ作成には、点検の専門的な知見が必要。
(この分野はAI技術者のみではAIが開発できない)
- ✓ トンネル変状のデータ数が少ない。→正常な箇所を覚えさせる

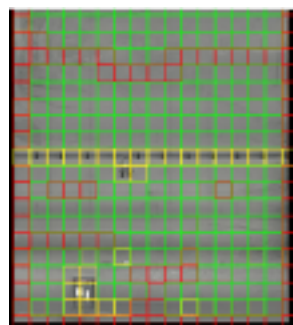


教師データ作成ツールの開発

計約34,000枚の教師画像を収集



手動による教師データ分類例



技術者間による
変状、健全部の判断基準の統一

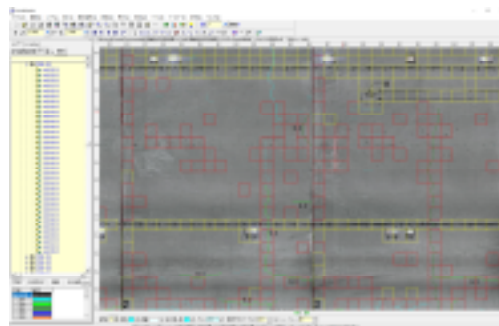
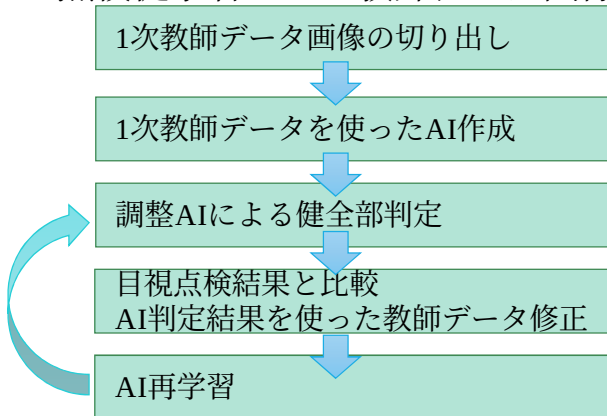
現状の技術レベルでは、点検機材間におけるデータの品質の違いは少なからずAIに影響を与える。機材、センサ(画像、レーザ、レーダ)毎にAIを調整する必要がある



新規教師データ作成の労力を減らすためには、AI調整済み機材と新規機材で同一箇所を計測し、データ共有するデータ連携体制が必要。

AI開発における異機材間の協調のためには、位置情報やデータ取得時の情報などを適切に残すことが重要

・点検従事者による教師データ画像収集・作成フローを作成



試作AI分類結果

実トンネルにおける支援内容の検証

近畿道路メンテナンスセンター R2近畿地整管内トンネル点検・診断及び修繕計画業務より

トンネル概要

トンネル名: トンネルA (L=740m)

トンネルB (L=330m)

トンネルC (L=38m)

トンネルD (L=1,420m)

トンネルE (L=2,810m)

トンネルF (L=389m)

施工方法: NATM(4本)、矢板工法(2本)

対象部位・部材: 覆工表面

対象とする変状の種類: ひび割れ、漏水、遊離石灰

トンネル断面変形モード

覆工巻厚・背面空洞



トンネルA



トンネルB



トンネルC



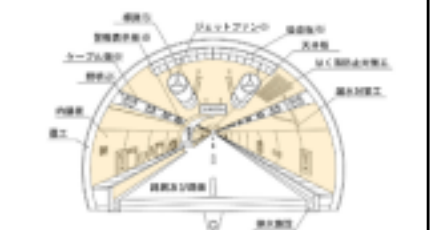
トンネルD



トンネルE



トンネルF



対象範囲 (オレンジ色): 対象範囲

トンネル全線の覆工コンクリートの表面に対して適用 (附属物等の背面、面壁、棲壁は対象外)

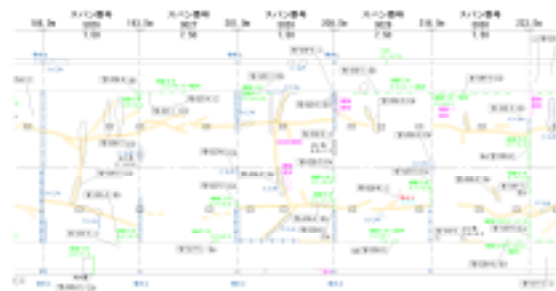
従来点検

近接+打音検査結果をスケッチにて記録



点検状況
(近接目視+打音検査)

近接目視+打音検査を実施し、その結果を現場にてスケッチして変状展開図を作成する。

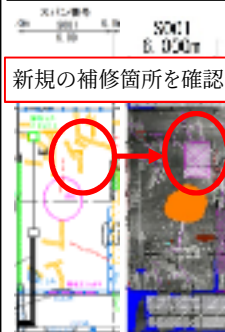


変状展開図 (スケッチ後に清書)

新技術活用点検

走行型画像、レーザー計測、およびレーダ計測による事前計測

画像計測技術の活用 (点検支援)



新規の補修箇所を確認

画像展開図に基づく机上点検を実施し、現地点検前に変状展開図を作成。現地点検時の重点着目箇所を事前確認。

現地点検時は、事前作成展開図の確認と、打音検査に注力。

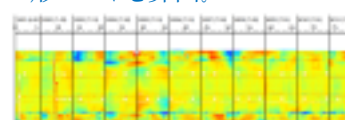


点検支援技術



レーザー計測技術の活用 (外力性の適切な診断)

目視点検では把握できない、トンネル内空断面の変形モードを算出。



過去の点検で外力性と診断した箇所も、外力性ではないと判明し、変状原因推定、変状区分修正に有効である

レーダ計測技術の活用

①空洞レーダ
巻厚不足や背面空洞の範囲を確認。

空洞の可能性のある反応を確認



※対象は矢板工法の2トンネル

②内部欠陥レーダ
うきの可能性のある範囲を事前抽出。
⇒現地点検時に確認

うきの可能性のある反応を確認

点検要領に対する支援評価

近畿道路メンテナンスセンター

R2近畿地整管内トンネル点検・診断及び修繕計画業務より

支援評価、適用性の検討

①圧ざ、ひび割れ（外力）

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
ひび割れ幅、長さ、進行性、ひび割れ密度	画像計測	○
外力性判定	レーザ計測	○

・画像解析により、ひび割れ幅(0.3mm以上)、長さ、進行性、ひび割れ密度を判定可能
・コンタ解析により、外力影響の有無を判断。

②うき、はく離（材質劣化）

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
うき・はく離	レーザ計測	△※1
	内部欠陥レーダ	△※2
ひび割れ閉合、材質劣化	画像計測	○～△※3

※1：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。

※2：うきが懸念される箇所の抽出は可能であるが、現地にて打音検査等による確認が必要となる(幾分多めに抽出する設定)。

※3：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。

③変形、移動、沈下

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。

④鋼材腐食

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
腐食面積	画像計測	○
断面欠損	内部欠陥レーダ	△※1

・鉄筋かぶり薄い箇所や錆汁の有無を画像により検出可能。

※1：要注意箇所として抽出できる場合がある。

⑤巻厚の不足または減少、背面空洞

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
覆工巻厚	非接触レーダー計測	△～×※1
圧縮強度	—	×

※1：探査深度 45 cm程度までは巻厚不足が疑われる箇所の抽出することができる。45cm以深の探査が必要な場合は、別途接触レーダ探査が必要となる。

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
背面空洞 深さ	非接触レーダー計測	△～×※1

※1：探査深度 45 cm程度までは背面空洞が疑われる箇所の抽出することができる。45cm以深の探査が必要な場合は、別途接触レーダ探査が必要となる。

⑥漏水

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
漏水・遊離石灰、つらら、側水	画像計測	○
漏水量	—	×
滞水・土砂流出・凍結	—	△※1

・画像により漏水・遊離石灰、つらら、側水の確認が可能。

※1：路面の画像撮影はできないため、漏水の度合い、変状箇所からの推定となる。

⑦付属物

変状の判定項目	対応技術	適用の判定
異常の有無	画像計測	△※1

※1：附属物本体の亀裂、腐食、欠損は画像にて確認することができるが、附属物本体や取付部材等の緩みやがたつきなどは現地点検時の触診等で確認をする必要がある。

支援技術を活用した診断 概要

閾値の考え方

変状種類	閾値			診断時の留意事項
	要素	計測精度 (3～6章)	対策区分判定・診断 (9章)	
①圧ざ・ひび割れ	幅	【矢板工法】 ひび割れ幅 1.0mmを検出 (状態の把握における対策区分の判定可能) 【山岳トンネル工法】	ひび割れ幅3.0mm程度 (目安例/0.3mm以上※) ※ひび割れ幅0.3mm以上 (維持管理便覧/凡例より) ⇒ ひび割れ幅1.0mm程度 (NEXCOより/変位等確認が必要)	左記要素含め、ひび割れ密度、進行性 (③参照) なども考慮する必要がある (はく落に繋がるものにも注意が必要)。また、左記要素に追加し、ひび割れ最小分解能: 0.3～0.5mm、ひび割れ幅の検出: 0.5mm刻みとする。
	長さ	ひび割れの長さ及び、進行の有無	ひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図 (維持管理便覧/付属資料) のひび割れ形態が分かるレベル	
	位置	ひび割れの位置及び、ひび割れ状況 (密集、外力性の有無)	ひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図 (維持管理便覧/付属資料) の発生位置が分かるレベル	
	色識別	変色箇所、豆板、漏水箇所のひび割れの有無	コンクリートに入ったひび割れが確認できるレベル (断面修復箇所、豆板などの材質劣化が確認できるレベル)	
②うき・はく離	大きさ	長さが0.05m以上の規模※¹⁾ が分かるレベル (近接目視と同等と想定)	長さが0.05m以上の規模※¹⁾ が分かるレベル (近接目視と同等と想定)	左記要素含め、うき・はく離に繋がる外力性ひび割れ (①参照)、変形・移動・沈下 (③参照) に伴ううき・はく離などにも配慮する必要がある
	検出率および的中率	従来点検と同等レベル	従来点検と同等レベル	
	位置	ひび割れの位置 (目地、コールドジョイント) 及び、ひび割れ状況 (密集、外力性の有無)	アーチ、側壁並びに横断目地・水平打ち継ぎ目・ひび割れ沿いなどの見分けができるレベル	
③変形・移動・沈下	変形・移動・沈下量	誤差2mm程度	1mm以上/年	進行時期、停滞時期も存在する可能性が高いため、複数年での監視が必要
	位置	覆工、路面、歩道、監視員通路、監査廊など (坑門工は不可)	ひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図 (維持管理便覧/付属資料) の発生位置が分かるレベル	

支援技術を活用した診断

閾値の考え方

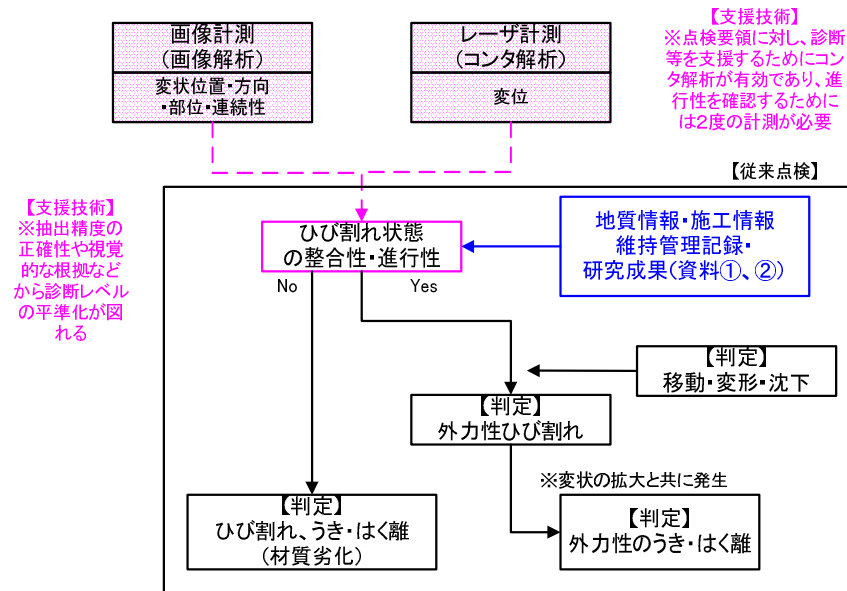
変状種類	閾値			診断時の留意事項
	要素	計測精度 (3～6章)	対策区分判定・診断 (9章)	
④鋼材腐食	位置	範囲の検出	アーチ、側壁などの見分けができるレベル	山岳トンネルにあるひび割れ防止筋なのか、RC構造なのかに留意が必要
	色識別	鋼材腐食の色判別（鋼材の断面欠損やうき錆の100%検出は困難）	コンクリートと鋼材並びに鋼材腐食が分かるレベル	
⑤巻厚不足または減少、背面空洞	大きさ	（非接触レーダ探査）巻厚45cm、巻厚30cm以下の場合には空洞100cm程度が確認できるレベル	巻厚30cm以上もしくは30cm以下の場合の空洞高さ30cm以上が確認できるレベル	巻厚は設計巻厚と有効巻厚が必要で、巻厚不足は巻厚のみ、突発性崩壊は巻厚と背面空洞で判定することに留意が必要 ※強度は支援技術以外での対応
	形状	（非接触レーダ探査）巻厚45cm、巻厚30cm以下の場合には空洞100cm程度が確認できるレベル	巻厚30cm以上もしくは30cm以下の場合の空洞高さ30cm以上が確認できるレベル	
	位置	アーチの天端、肩より天端側、肩より側壁側かなど（診断にはあまり影響ないと思われる）	アーチの天端、肩より天端側、肩より側壁側かなど（診断にはあまり影響ないと思われる）	
	検出率および的中率	従来点検と同等レベル	従来点検と同等レベル	
	強度※	（コンクリート強度試験で確認）	コンクリート設計基準強度との対比ができるレベル	
⑥漏水等による変状	位置	噴出、流下、滴水の検出（にじみは、壁面の汚れなどの関係で100%検出は困難）	アーチ、側壁などの見分けができるレベル	利用者への影響度合いで判定し、路面に発生する滞水状態についても留意が必要
	色識別	漏水、遊離石灰、凍害（つらら、側水）の有無	にじみ、滴水、流下、噴出などの漏水と遊離石灰、つらら、側水などが見分けられるレベル	

※）現場点検作業において、うきを変状展開図に記載する大きさであり、経験値に基づく規模

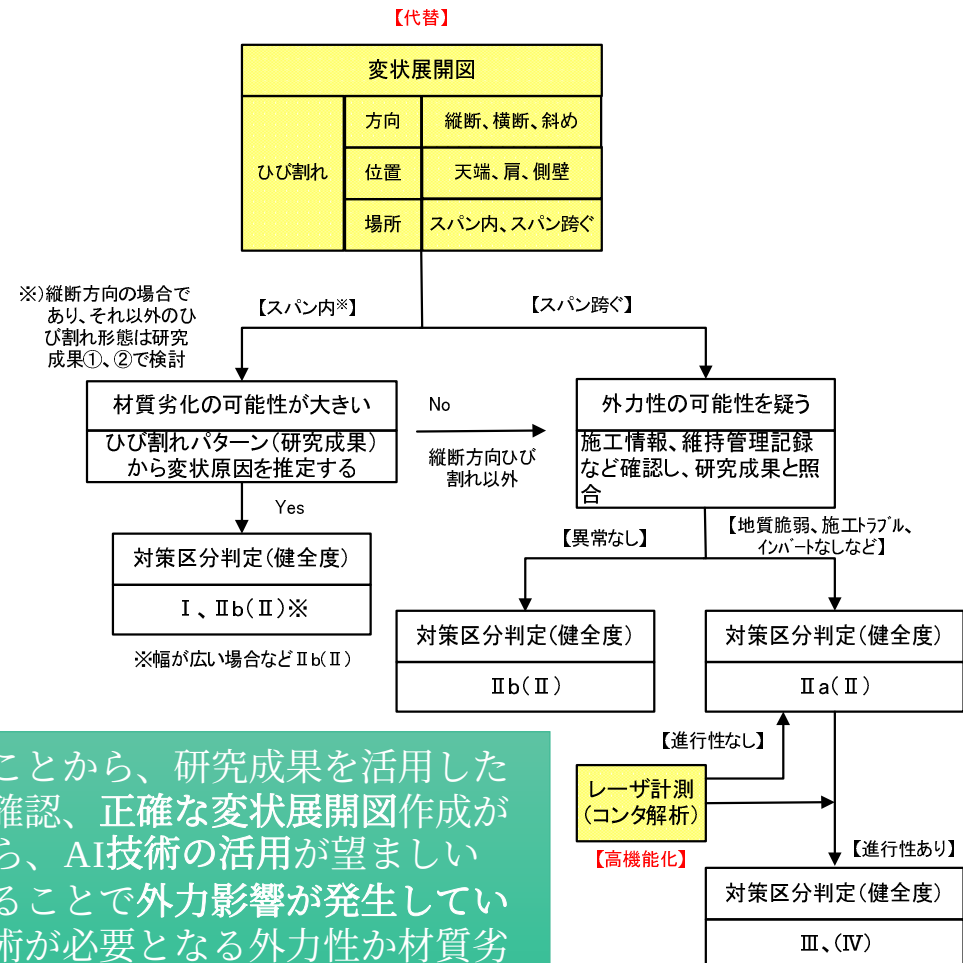
支援技術を活用した診断

点検要領(判定の目安) に対する支援内容

外力性、材質劣化の判定への支援



健全性診断に対する支援



- 画像計測では、ひび割れが正確に確認できることから、研究成果を活用した判定を支援可能である。(ひび割れが正確に確認、正確な変状展開図作成が可能。) 作業効率を上げる必要があることから、AI技術の活用が望ましい
- レーザ計測データによるコンタ解析を実施することで外力影響が発生しているのか確認ができることから、高度な専門技術が必要となる外力性か材質劣化かの判定の難易度が若干下がることが期待される。
- 非接触レーダについて、巻厚不足や突発性崩壊は、有効巻厚の確認が必要であるため他の技術と組み合わせることが重要。スクリーニングに有効であること、画像計測などと同時に巻厚や空洞確認ができることは効果的である。

支援技術を活用した診断

健全性診断に対する支援

変状区分毎で取りまとめたものを下表に示す。

健全度診断に対する検討結果（各変状区分毎）

変状区分		変状種類	支援技術	従来技術	検討結果
外力	材質劣化	圧ざ・ひび割れ	画像計測 レーザ計測 ＜コンタ解析＞	施工情報 維持管理記録	外力：代替（高機能化） 材質劣化：補完 ⇒+αで代替
		うき・はく離	レーダ探査 画像計測 （レーザ計測）	打音検査 （叩き落とし）	
外力		変形・移動・沈下	レーザ計測 ＜コンタ解析＞	測量 機器計測	外力：代替（高機能化）
材質劣化		鋼材腐食	画像計測	（近接目視）	材質劣化：補完 ⇒+αで代替
材質劣化		巻厚不足または減少、背面空洞	レーダ探査 （非接触）	レーダ探査 （接触） コンクリート強度 試験	
漏水		漏水等による変状	画像計測	（遠望目視）	漏水：補完 ⇒+αで代替

①外力：代替（高機能化）

②材質劣化：補完 ⇒ +α（打音、接触レーダ探査、圧縮強度等）で代替

③漏水：補完 ⇒ +α（遠望目視等）で代替

・ 施工時の活用

施工時における現有技術の活用

・ 施工管理への活用

【切羽観察記録】

NETIS登録技術 「AIによる山岳トンネル切羽評価」
民間サービス 「切羽AI評価システムサービス」

【凡例】
1:概ね新鮮 2:割目沿いの風化変質
3:岩芯までの風化変質 4:土砂状風化、未固結土砂



共通プラットフォーム
が望まれる

【穿孔エネルギー】（地山の硬軟の数値化）

・ コンピュータジャンボの普及、開発

NETIS登録技術 「ドリルNAVI」
「削孔パターン最適化コンピュータジャンボ」



穿孔探査機
(全削岩機)

が保持姿勢・位置
穿孔制御

ドリルNAVI 概要図

今後求められる技術と活用

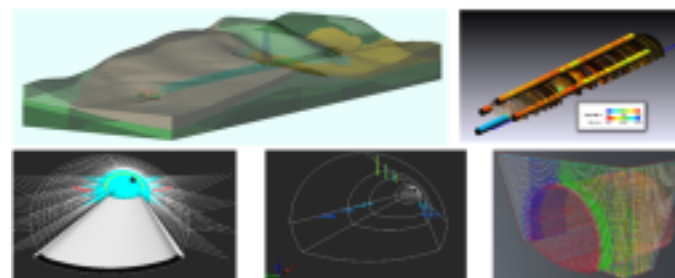
施工段階では様々な計測が実施されているが
そのデータは工事完了後に活用されていない
(死蔵あるいは廃棄)

維持管理段階へと繋げるためにデジタル化
データ活用に必要な技術と課題

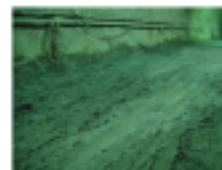
出来形管理
への導入

走行型計測
システム

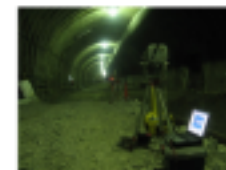
BIM/CIMと
の連携



【今後の課題】 計測機器の車載化
内部空洞探査の効率化・省力化
設置型から走行型へ 高解像度デジタル撮像機器を車載化



不陸路盤への対応



坑内作業・工事車両
との兼ね合い



発注者の協力
(推進力)

3次元データを活用し高度な施工管理を行い、余堀の低減や材料
のコスト削減、人材不足の中でも業務の効率化を図る

・運用マニュアル

高度なトンネル点検支援技術運用マニュアル（案）

本研究では、点検支援技術カタログにおいて一定の技術評価を得た技術およびその可能性の高い技術を取り扱い、高度なトンネル点検支援技術運用マニュアルとしての位置付けを目指す

「トンネル点検支援技術の高度化に関する研究」成果に基づく
高度なトンネル点検支援技術運用マニュアル（案）

2021 年 3 月

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チーム

章	項	記載内容
1. 高度なトンネル点検支援技術運用マニュアルについて	1.1 本マニュアルの目的	
	1.2 本マニュアルの構成	
	1.3 本マニュアルの使用方法	
2. 適用条件	2.1 本マニュアルが取り扱う支援技術と支援内容	
	2.2 支援技術の要求性能	
	2.3 支援技術の使用環境	
	2.4 支援技術の適用が推奨される条件	
3. 画像計測技術	3.1 画像計測技術の枠組み	
	3.2 画像計測技術の計画	
	3.3 画像計測技術の精度管理	
	3.4 画像計測技術の成果物	
	3.5 画像計測技術の品質管理	
	3.6 施工時データの取扱い	
	3.7 特殊な状況下での技術適用	被災後の適用
4. 非破壊検査技術	4.1 非破壊検査技術の枠組み	
	4.2 非破壊検査技術の計画	
	4.3 非破壊検査技術の精度管理	
	4.4 非破壊検査技術の成果物	
	4.5 非破壊検査技術の品質管理	
	4.6 施工時データの取扱い	
	4.7 特殊な状況下での技術適用	
5. 計測・モニタリング	5.1 計測・モニタリングの枠組み	レーザ計測
	5.2 計測・モニタリングの計画	
	5.3 計測・モニタリングの精度管理	
	5.4 計測・モニタリングの成果物	
	5.5 計測・モニタリングの品質管理	
	5.6 施工時データの取扱い	
	5.7 特殊な状況下での技術適用	
6. 成果物管理	6.1 成果物の仕様	
	6.2 成果物管理	
	6.3 BIM/CIMの適用	
	6.4 i-constructionの適用	

・運用マニュアル

・適用効果が期待されるトンネルの条件

- ① トンネルの劣化が経年的進行であるとするならば、前回点検時のこれら情報と新規に取得した情報を比較し、多様な着目項目について経年変化を客観的に提示できる支援技術はすべてのトンネルに適用価値がある
- ② 支援技術には省力化、コスト縮減の指向もあり、非常に短いトンネルや変状が極端に少ないトンネルにおいては、支援技術を投入することが省力化に繋がらない場合も生じる

トンネル変状および点検延長	トンネル変状からの適用性	点検延長からの適用性
100m未満	小規模トンネルは低土被りで変状が発生しやすく適用性は高い	支援技術による省力化は期待できない
100 ～ 500m 未満	同上	変状が少ない場合には支援技術による省力化が期待できる
500m ～ 1km 未満	経年変化把握のため、支援技術の適用が推奨される	変状の多少に関わらず支援技術による省力化が期待でき適用が推奨される
1km以上	経年変化把握のため、支援技術の適用が推奨される	変状の多少に関わらず支援技術による省力化が期待でき適用性は高い

・運用マニュアルの課題

- ① 支援技術を正しく評価し、画像などデータ取得と解析の分業化を促進するには、**プロセスごとの性能規定化**が必要
- ② 前回点検時の画像データなど継承して経時変化を可視化する際、受領データの画像（座標）品質が低いと成果品としての経時変化（経時変化図、コンター図）の精度も悪くなる
- ③ 後継作業を担当するコンサルタント等の業務品質を確保するためにも、プロセスごとの性能規定が必要



・性能規定に基づく支援技術運用マニュアルの考え方

- ① 道路トンネルの性能規定に立ち返り、**定期点検の持つ意味**を定義
- ② 道路トンネルが保有しなければならない性能に対して、最適に資する点検活動の提案、設計を可能にする
- ③ 運用マニュアルや点検支援技術カタログも**性能規定型に成長**させていくことが望ましい
- ④ **互換性担保**を求める技術については、プラットフォームとなる成果品取りまとめ要領が必要である



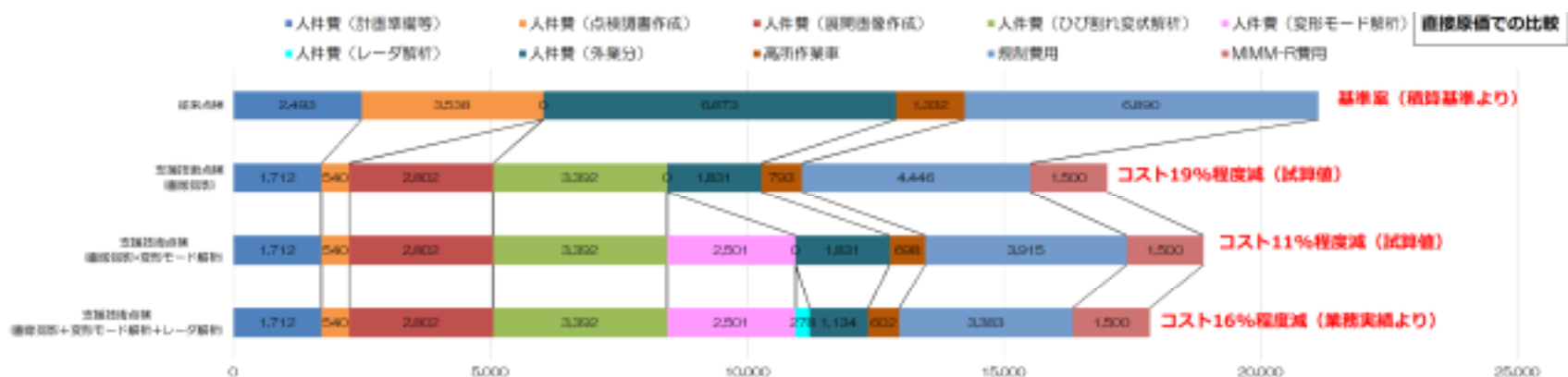
トンネル性能規定と点検評価、性能規定文書の関係：野村らの研究成果による

・コスト縮減、効率化検討

・縮減効果検討

近畿道路メンテナンスセンター
R2近畿地整管内トンネル点検・診断及び修繕計画業務より

6トンネル、総延長5,727mにおけるコスト比較



・効率化検討

本業務での点検実績を踏まえた従来点検時の点検日数と今回業務での実績日数

号線	事務所	トンネル名	点検内容	トンネル延長(m)	点検面積(m ²)	ひび割れ密度(m/m ²) ^{*1}	従来点検			本業務（新技術活用）			効率化低減率
							点検日数(日)	作業班 ^{*2}	高所作業車の台数	点検日数(日)	作業班 ^{*2}	高所作業車の台数	
国道27号	福知山		監視	740	1,195	0.08	1	2	2	1	2	2	0
国道9号	豊岡		定期	330	6,022	0.14	1	2	2	1	2	2	0
国道9号	豊岡		定期	38	841	0.55	1	1	1	1	1	1	0
国道483号	豊岡		定期	1,420	29,652	0.14	4	3	12	1	3	3	75%
国道483号	豊岡		定期	2,810	59,249	0.14	7	3	21	3	3	9	57%
国道24号	奈良		定期	389	8,376	0.19	2	2	4	1	2	2	50%
			合計	5,727	105,335								
						1km未満	5		9	4		7	20%
						1km以上	11		33	4		12	64%
						合計	16		42	8		19	50%

今後の展望

1. 研究成果のまとめ（支援レベル）

走行型計測技術等のトンネル点検支援技術の高度的活用により、高品質化・効率化・省力化を図ることが実現でき、更なる実装化が可能となる。

- ①事前の展開図作成、スクリーニングによる近接目視時の点検作業の効率化
- ②点検表作成作業の効率化
- ③目視点検に先立つ覆工展開画像活用（変状抽出、AI活用）による効率化
- ④展開図の高品質化（変状位置精度の正確性）
- ⑤机上点検後の現地点検による変状抽出漏れ防止
- ⑥複数技術の実証実験により、画像、レーザともに同様の支援ができ、データの互換性も確保
- ⑦レーザについて、断面計測精度の検証、縦断位置補正・回転補正の方法を提案、コンター解析による外力性診断の有効性を実証
- ⑧レーダについて、健全部を除外するスクリーニングに有効、巻厚・空洞情報を点検時に提供でき適切な診断が可能（組合せ技術も活用）
- ⑨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
- ⑩点検要領の判定の目安および健全診断に対し、検討した高度化技術は点検診断を有効に支援でき、代替あるいは高機能化が可能（一部は技術の組合せにより代替可能）
- ⑪外業、内業を総合しコスト縮減、効率化を実現

2. 高度化技術の有効活用,留意点

- ①帳票の点検記録に加え、画像や形状などの計測データを取得し、保管管理することが重要
- ②データベース、共通プラットフォームが必要
- ③状態や進行性の定量評価には、初期計測が重要
- ④進行性差分計測による有害な損傷の早期発見
- ⑤人とロボットのベストミックスが望ましい
- ⑥画像、点群、非破壊検査、AIなど有効な技術を組合わせて診断を行うことが重要
- ⑦BIM/CIM、i-Conなど設計から維持管理段階で一貫したデータ活用、汎用性の確保が重要
- ⑧新技術は、目的、適した対象、ユースケース、性能規定に基づき活用することが重要
- ⑨データ・診断の品質を確保するため、計測時の留意点、マニュアル化、データ標準化が重要
- ⑩高度化技術を活用した次期点検要領が望まれる

3. 今後の方向性

- ①補完、代替技術として省力化、効率化を進める
- ②AI、自動化、遠隔化など更なる高機能化を促進
- ③点群位置情報、物理情報と3D可視化、AI診断などを組合わせ3D～5Dのデジタルツインを構築
- ④点検マネジメントサイクルを支援し、社会実装を具現化する
- ⑤研究は終了するが、今後もオープンイノベーションとして、社会実装の活動を継続していく。