

新都市社会技術融合創造研究会
第16回新都市社会技術セミナー

●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

トンネル維持管理の課題とロボット技術開発の目的

坑内は狭隘で暗く、厳しい条件下での作業

- 点検者による評価のバラツキ、見落としが懸念
スケッチによる記録

- 客観性に乏しく、変状進行性の判断が困難

打音検査の課題

- 打音には個人差が生じ、時間と労力を要し、非効率
交通規制を伴う作業（道路トンネル）

- 危険作業、渋滞の発生

➡ 規制を最小限とした客観的で効率的な点検手法の導入が必要

走行型計測システム MIMM開発目的

道路トンネルにおいて、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従来点検前に計測し、近接目視、打音検査の併用技術として支援するとともに、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。

➡ 課題）点検コストの低廉化、社会実装、管理者支援等

本研究のニーズ，目的

【ニーズ】 本研究を進めるにあたり、以下のニーズを研究成果に反映する

点検コストの低廉化

- ・ 非破壊検査技術＝走行型計測を活用しても安くならなければならない
- ➡ 点検後の記録では、近接目視点検費に走行型計測費を加えると割高になる
- 計測延長が長いと距離あたりの単価は改善されるが、短いと割高になる

社会実装と管理者支援

- ・ 本研究によってこれまで以上に性能や精度を高める必要がある
- ・ 研究成果の社会実装を進め、管理者が効果的で有効に活用できる技術として整備し、世の中に普及させなければならない

【目的】 ニーズを踏まえ、以下を本研究の目的とする

低コスト化，点検効率化，点検・診断の高精度化，帳票省力化

- ・ 合理的かつ効率的な点検手法の検討（点検作業～調書作成～診断）
- ・ 非破壊検査技術の有効活用による点検支援技術の高度化の検討

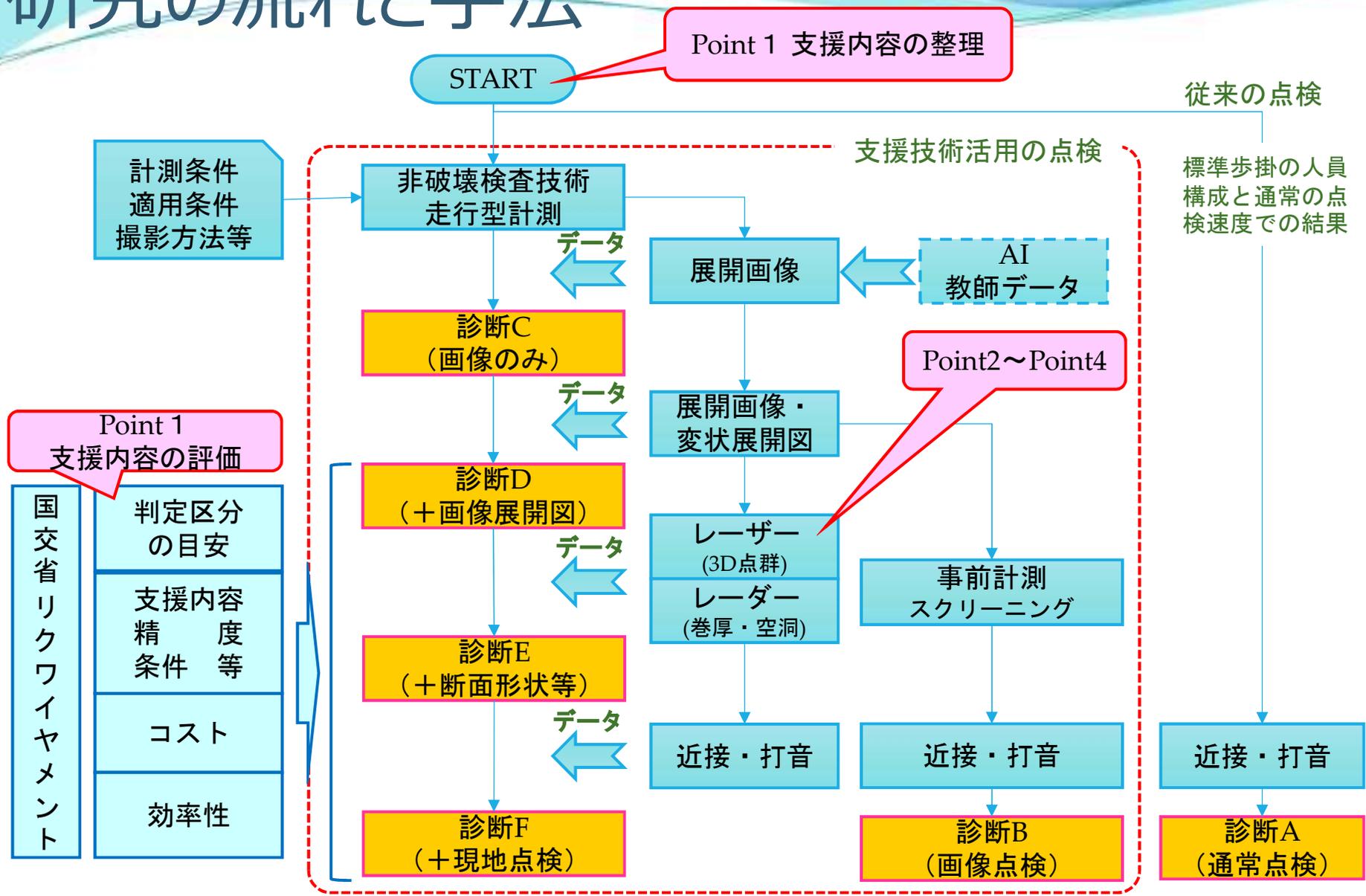
研究項目

研究項目	点検・計測	解析	診断	管理
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		トンネル定期点検の支援技術の明確化 変状原因・進行性の把握, 空洞などを加えた総合的な診断支援		Point 1 点検要領 判定目安に対する支援内容の整理
		計測・データ解析方法について, 要求性能に応じた標準化を検討し, 効果的な点検支援の高度化技術 各種損傷(ひび割れ, うき, はく離, 変形, 漏水等)の検出精度の向上策の検討		Point 2 レーザ点群を活用した検出精度向上
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		画像による各損傷の自動認識, 損傷展開図の自動作成	Point 3 適切な教師データによるAI学習 (変状, 展開図, 判定をセットにして属性付与)	
		変形・空洞などの物理情報をあわせた健全度診断支援, 判定精度向上		
③i-Construction推進に向けたトンネルDBの有効活用検討	3次元形状データの出来形検測への活用	誤差を適正化した高度解析技術による変形評価法	Point 4 衛星不可視下での正しい中心軸決定の課題を解決	生産性向上を目的とした3次元モデル・データ管理データベース活用方法の検討

成果 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
- 従来の定期点検に対して、トンネル走行型計測によってどこまでの支援が可能であるか、検出能力、精度について検証を行った。

研究の流れと手法

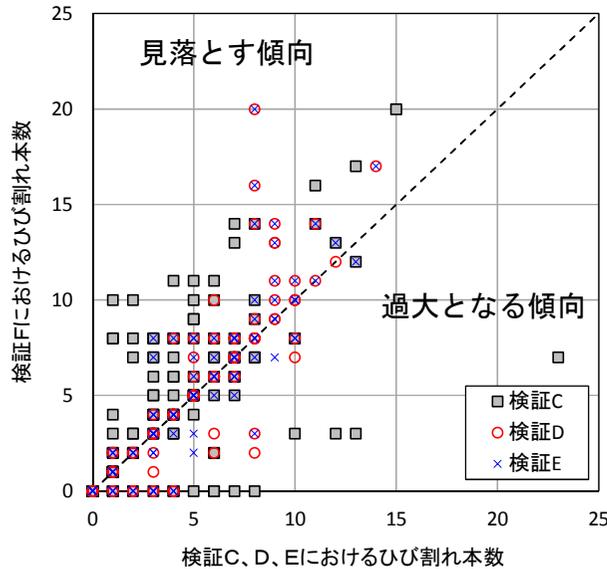


本来は近接目視，打音検査を厳密に実施した診断結果（正值）を比較ベースとするべきであるが，今年度は既往のデータでの比較を想定しているため，診断Fを正解として診断C～Eの効率、精度、コストを検証する

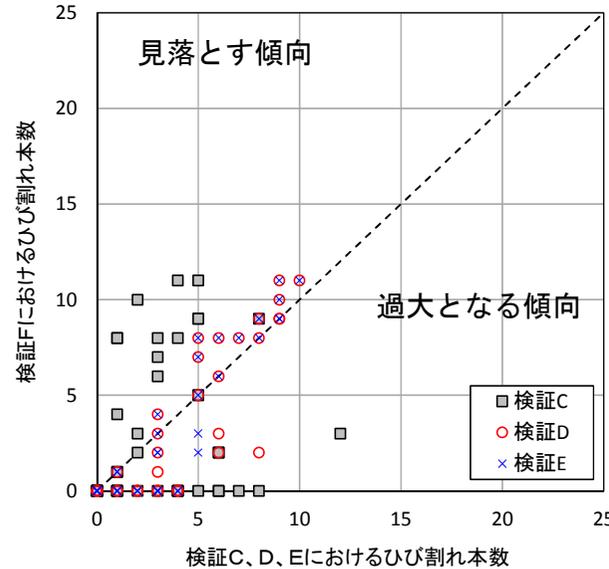
検証結果

検証Fに対するひび割れ本数の分布

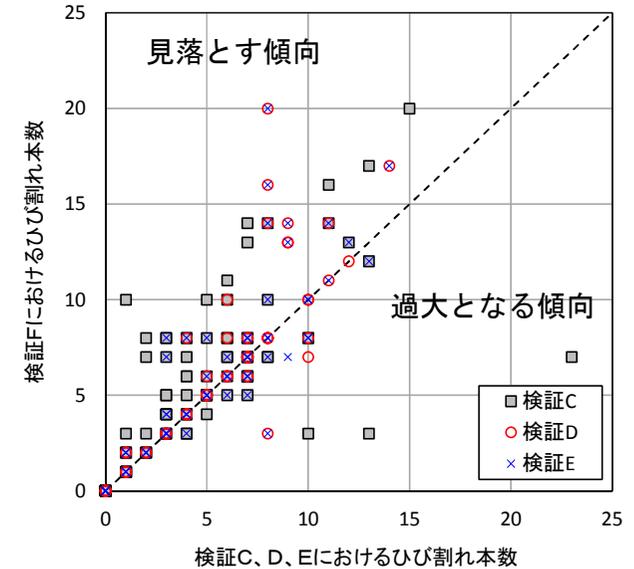
ひび割れ本数に関する比較(全体)



ひび割れ本数に関する比較(5年未満)



ひび割れ本数に関する比較(5年以上)



- ①ひび割れの検出は、段階が増すごとに精度が上がっていく。
- ②実際の点検において、展開画像があると点検精度が向上する。
- ③展開画像によるスクリーニング効果が高いことが判明した。

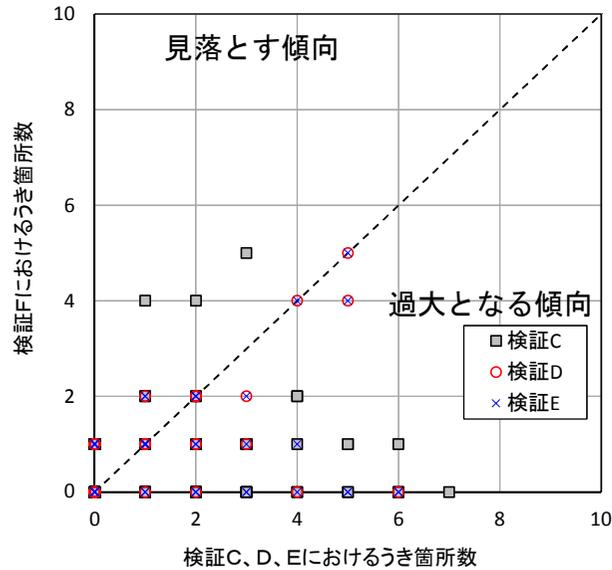
評価項目	経験年数	検証C	検証D	検証E
検証Fとの相関係数(一次)	全体	0.62	0.88	0.89
	5年未満	0.25	0.86	0.91
	5年以上	0.70	0.88	0.87
検証Fとの差分の標準偏差	全体	3.55	2.11	2.04
	5年未満	4.06	1.94	1.63
	5年以上	3.20	2.04	2.12

- ・外力性のひび割れを対象とした検証データを追加する必要がある。
- ・ひび割れや変形の進行性を対象とした差分評価を検証する必要がある。
- ・若年者のバラツキを減らすためにも運用マニュアルやAI活用が重要となる。

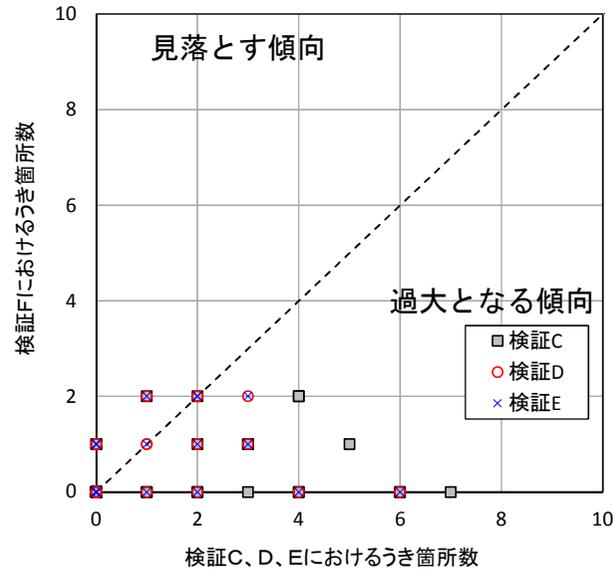
検証結果

検証Fに対するうき箇所数に関する分布

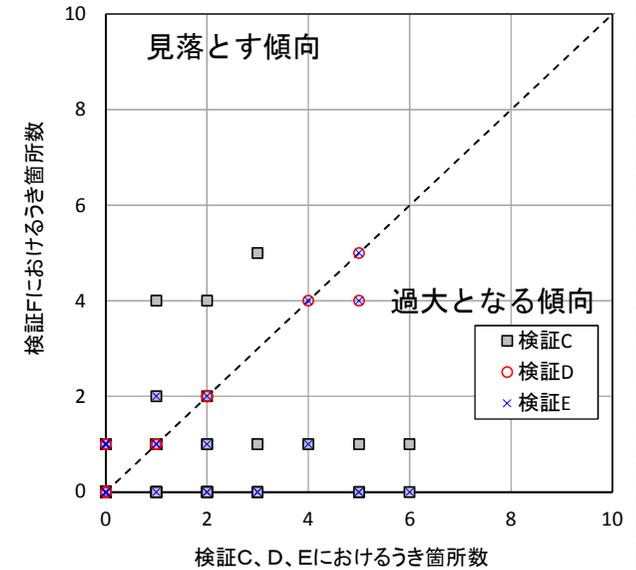
うき箇所数に関する比較(全体)



うき箇所数に関する比較(5年未満)



うき箇所数に関する比較(5年以上)



- ①事前に展開画像があれば、健全箇所でのスクリーニングができる。
- ②熟練者であれば、あらかじめうき候補を予測することができる。
- ③展開画像のみによるうきの検出はバラツキがあり、実際よりも過検出の傾向がある。



評価項目	経験年数	検証C	検証D	検証E
検証Fとの相関係数(一次)	全体	0.23	0.69	0.45
	5年未満	0.27	0.39	0.34
	5年以上	0.25	0.91	0.49
検証Fとの差分の標準偏差	全体	1.68	0.78	1.23
	5年未満	1.91	1.19	1.21
	5年以上	1.52	0.37	1.23

- ・ 明瞭なうきや打音記録を含めた検証データを追加する必要がある。
- ・ 外力作用を受けたトンネルやレーダデータを含めた検証が必要である。

Point 1

各判定の目安に対する支援内容の検証結果と課題(今後の方向性を考慮)

評価のポイント	検証結果と課題	取組方針
ひび割れ	・外力性が判定できるか	△ 画像のみでは困難 → レザ点群活用:方針①
	・幅, 長さが抽出できるか	○ 0.3mm程度以上可能 → 健全性診断: 方針⑥
	・進行性がわかるか (客観的位置)	○ 前回との比較で可能 → レザ点群活用:方針②
	・ひび割れ密度 ・微細ひび割れが必要か ・遊離石灰, 漏水で視認不可の場合	○ 抽出可能 △ 議論が必要 △ 画像のみでは困難 → AI活用: 方針⑤ 経験的に可能か?
うき	・画像からどの程度まで判定可能か ・閉合ひび割れ, 交差・分岐内側 ・目地沿いのうきに繋がるひびわれ ・ジャンカ, はく落, 欠け ・変色, 劣化, 漏水 ・打音との併用が必要	△ 画像のみは限界あり → レザ計測活用:方針④ (表面うき, ジャンカ) ○~△ 親指大程度可能 → 健全性診断: 方針⑥ ○~△ ひび伴うものは可 ○~△ ある程度可能 ○~△ 一部有効では? → レザ点群活用:方針③ △ 最終評価は打音が必要
変形	・レザ点群活用の有効性 ・外力性か否かの判定	○ 変形には有効 → レザ点群活用:方針① ○ 有効 ルール必要 → レザ点群活用:方針②
鋼材腐食	・付属施設の判定 (重要度アップ)	○~△ 視認できれば可能 → レザ点群活用:方針③ AI活用: 方針⑤
巻厚不足 背面空洞 有効巻厚	・覆工巻厚不足, 背面空洞の判定 ・有効巻厚の判定	×~△ 画像・MMSだけでは困難 → レザ計測活用:方針④ 健全性診断: 方針⑥ ×~△ 打音検査だけでも困難 → レザ計測活用:方針④
漏水	・漏水・遊離石灰 規模・位置判定 ・漏水量の判定	○~△ 画像/点群輝度可 → レザ点群活用:方針③ △~× 量は困難 AI活用: 方針⑤

検討成果から得られた課題抽出

方針①レーザ点群活用方針：外力性の評価

方針②レーザ点群活用方針：変形モード解析、進行性評価

方針③レーザ点群活用方針：反射輝度による漏水、遊離石灰などの検出

方針④レーダ計測の活用：覆工巻厚、背面空洞、
内部欠陥[うき、ジャンカ]の探査

方針⑤AIの活用：漏水、遊離石灰、付属施設などの
AIによる変状検出精度の向上

方針⑥健全性診断：点検技術高度化による適正な健全性診断技術

成果 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
- レーザ計測に関して、形状からのトンネル特徴量の抽出の可能性と、反射強度に着目した変状抽出の可能性について検討を行った。
- 点検支援AI構築に向けて、機械学習を用いたレーザ点群からのトンネル覆工面変状の抽出、レーザ点群を用いたトンネル内構造物点検手法の構築、また診断支援AI構築に向けて、センサ情報統合による健全度診断の効率化・判定精度の向上について検討を行った。

変状抽出精度の向上策の検討

レーザ点群を活用した変状検出精度の向上策の検討

点群形状から認識可能

照明,ケーブル,
ケーブルラック

画像と反射強度から認識可能

遊離石灰, 補修を
伴うひび割れ

反射強度から認識可能

漏水
遊離石灰



水平目地位置

目地補修跡

点群形状, 反射強度から
認識可能

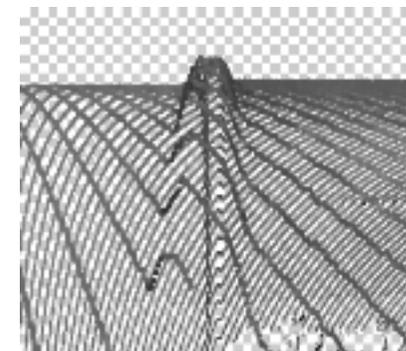
レーンマーク
縁石変状

点群形状, 反射強度から認識可能

路面隆起
陥没

変色
(うきの可能性)

反射強度から認識可能



レーザによる目地位置
(三角・台形目地の場合)

明確にトンネル壁面から突出した形状をしていれば附属物はスクリーニングが可能

反射強度と画像を併用することで、
画像からはわかりづらい変状の検出
の可能性

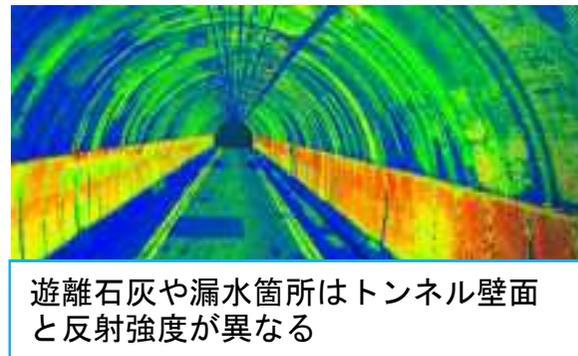
AI技術活用による健全度診断の効率化・判定精度向上の検討

▼機械学習を用いたトンネル覆工面変状の抽出

最終ゴール： トンネル覆工面点群データ（3次元位置，反射強度）から変状の存在する箇所の特徴を機械学習により特定し，**変状位置と種類（程度）を自動検出できるモデルを構築する**



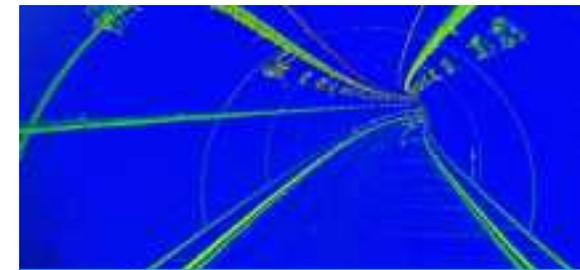
明確な3次元位置を特定可能



遊離石灰や漏水箇所はトンネル壁面と反射強度が異なる

反射強度

点群からの変状抽出の可能性



形状変化に着目することで目地やケーブルが強調される。

曲率変化点の抽出

	ひび	うき・剥離	漏水	ゆがみ
intensity	×	○	○	×
xyz	×	△	×	○

課題点： 適切な学習データへの変換が必要

学習データが不足しているので延期・データが集まれば変換方法について検討

▼レーザ点群を用いたトンネル内構造物点検手法の構築

過去の計測と最新の計測結果からトンネル内構造物の点群形状の差を求めて構造物に異常がないか探索する（今後はこの項目について重点的に検討）

▼センサ情報統合による健全度診断の効率化・判定精度の向上

画像・レーザ点群・レーダを統合し、それぞれの相関関係を表す何らかの指標を求め、この指標からトンネルの健全度を求める

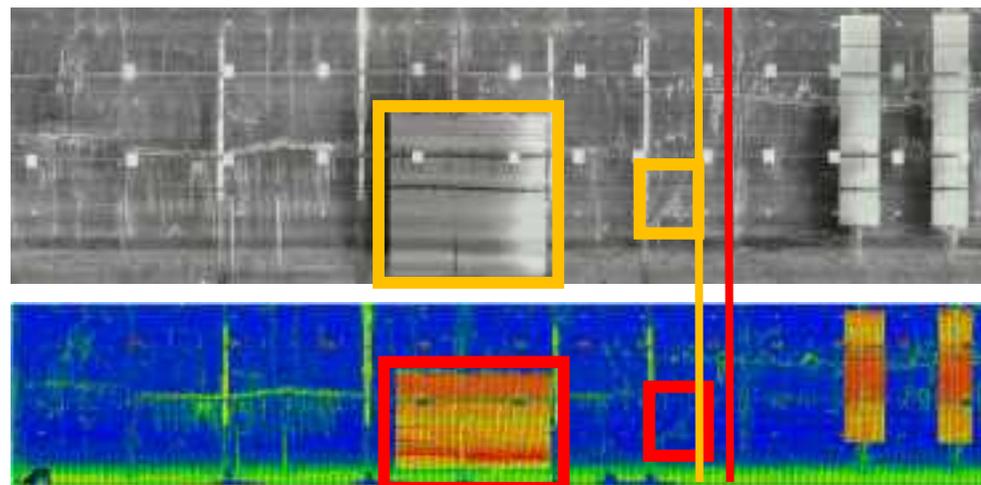
AI活用に向けた画像・レーザ点群・レーダを統合への課題点

レーザ点群とカメラ画像の同期が取れていないため
点群と画像で異なる位置が同一位置として紐づけられてしまう



レーザ点群と画像の精密な位置
合わせが必要
(過去の計測データとの位置比較
においても重要な要素)

位置合わせの際、点群と画像
の共通するマーカとなる特徴
が必要



画像

点群
(反射
強度)

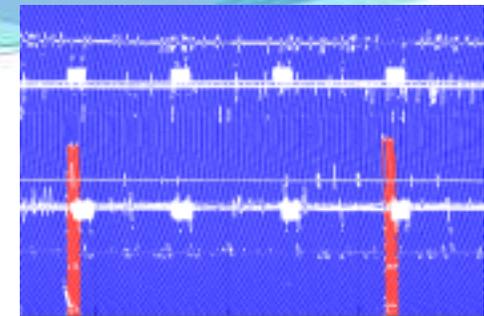
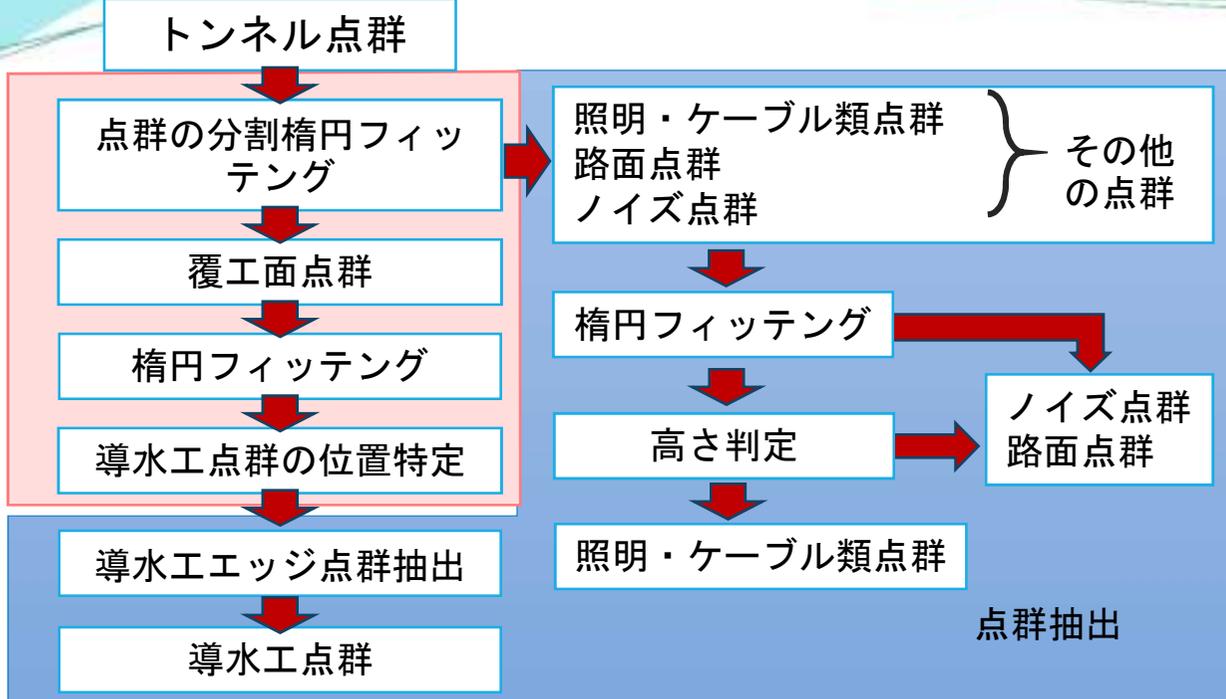
トンネル展開図



目的

画像と点群の双方から抽出可能な特徴的な構造物を定義し、それぞれレーザ点群から
抽出する方法を試作する

点群からのトンネル内特徴量の自動抽出



導水工点群抽出例



照明・ケーブル類点群抽出例

評価結果

導水工点群の自動抽出率 92~97%

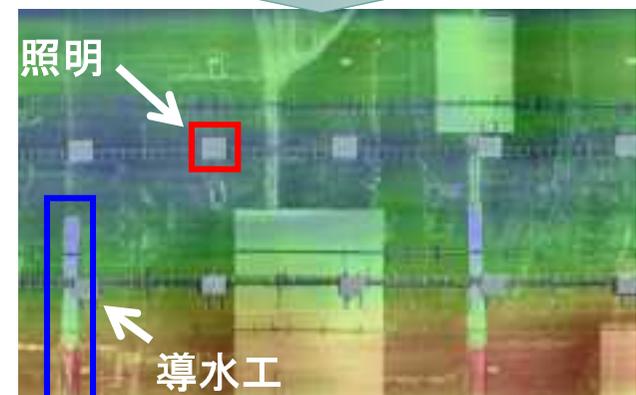
照明・ケーブル点群の自動抽出率 43~94%

■抽出率低下の原因

覆工面から比較的近いケーブル類点群の抽出率が低い
一方で照明は抽出率が高い

照明や導水工による画像と点群の自動位置合わせが可能な見通しを得た

➡ 多種類データの統合AIや複数年での変状比較への可能性

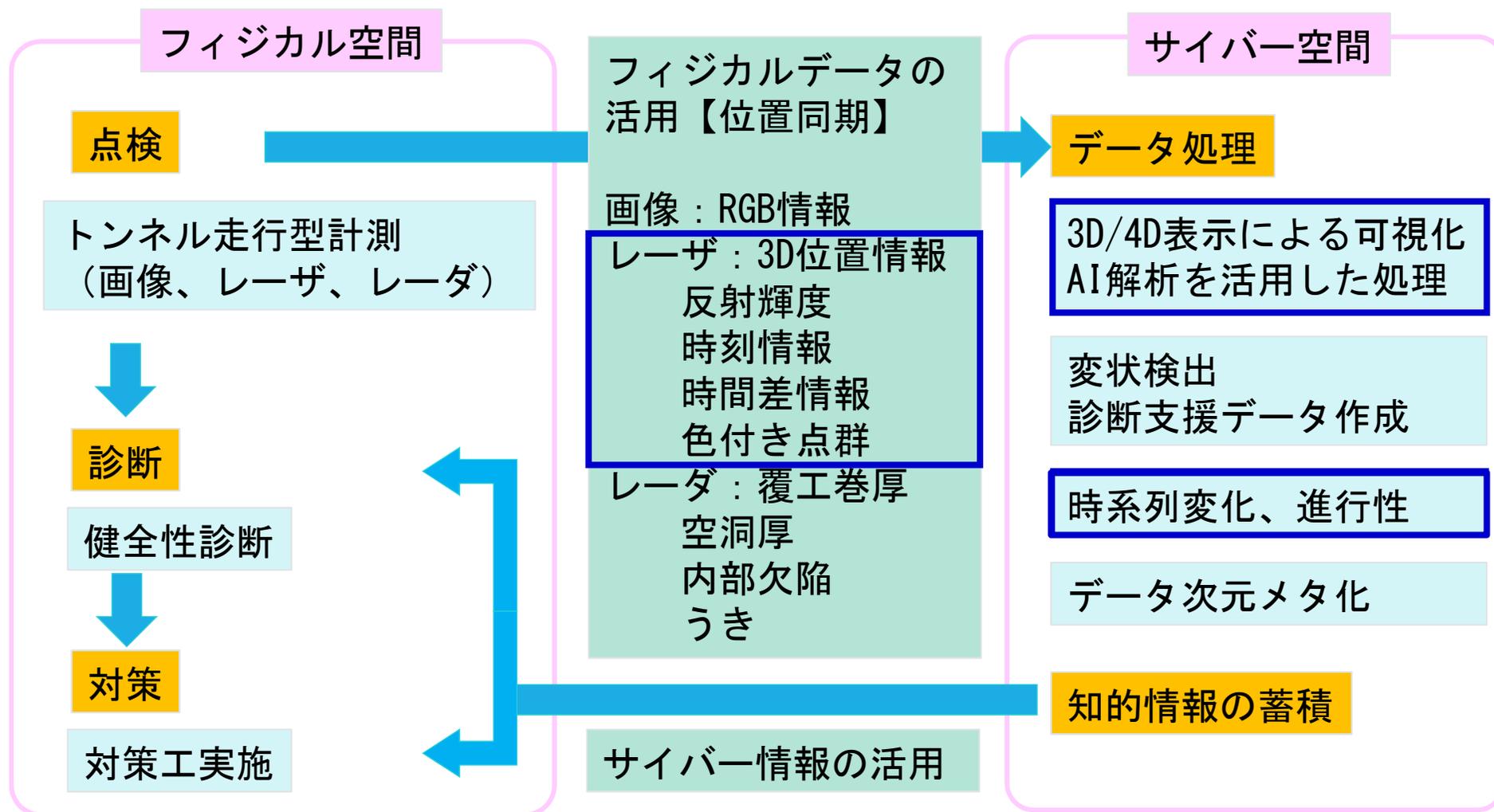


展開画像と点群の位置合わせ重畳表示
(照明位置で位置合わせした場合)

今年度の取組み方針のポイント

- 点検支援技術をいかに高度化して健全性診断に活用するかが第一の研究ポイント
- AI、デジタルツインなど新技術の活用も踏まえ、一層効果的で合理的なスマートインフラマネジメント手法の確立に向け取り組んでいく

• デジタルツインの具現化による健全度診断技術の高度化
(Society5.0)



Point 3

AI活用:方針⑤

健全性診断:方針⑥

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

変形・空洞などの物理情報をあわせた健全度診断、判定精度向上の検討

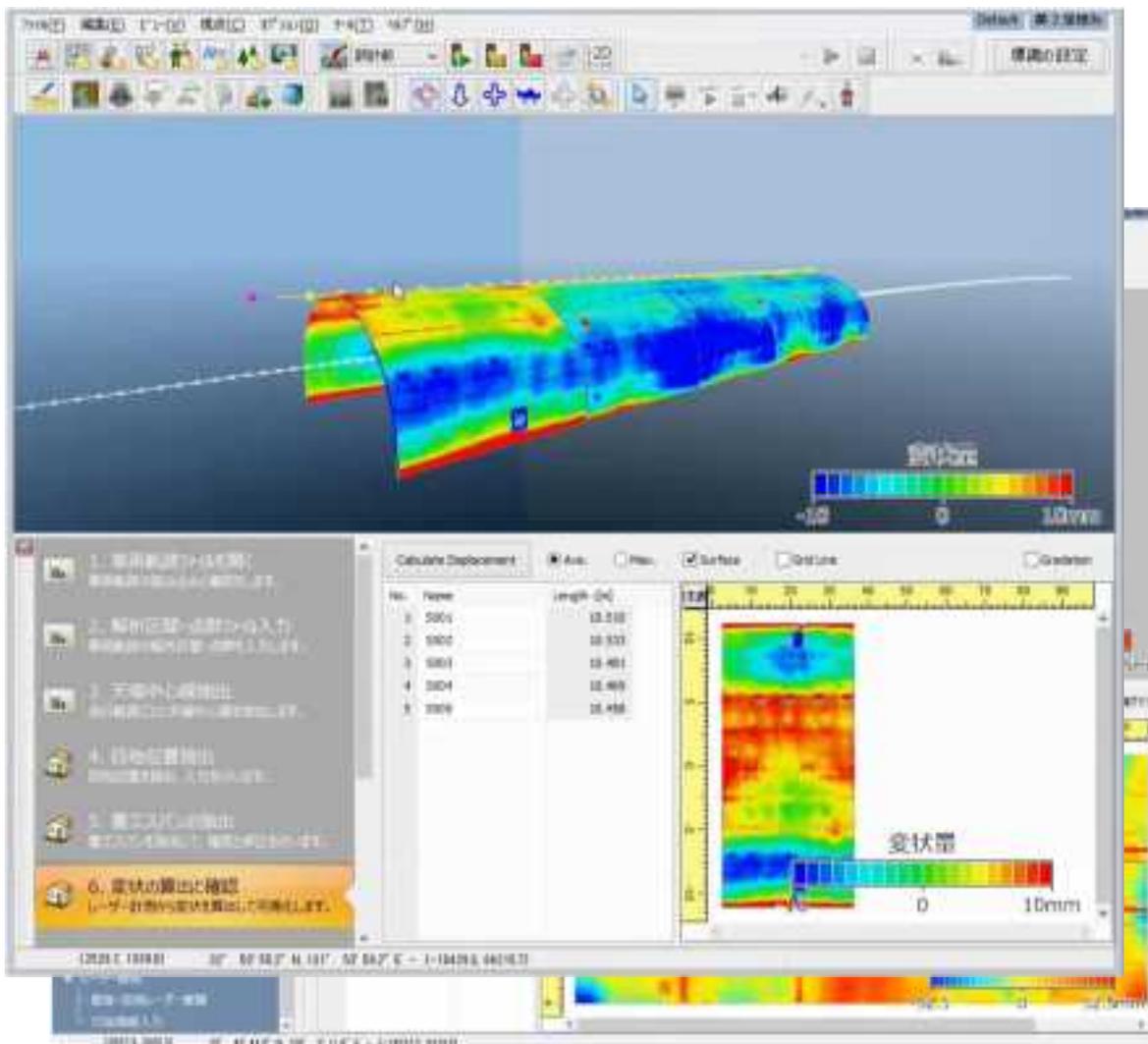
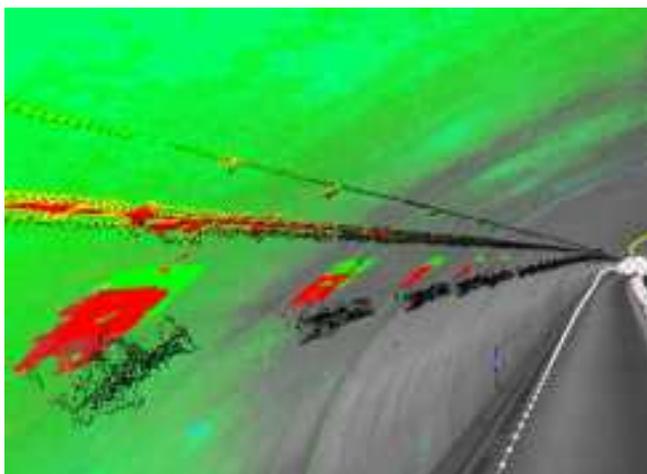
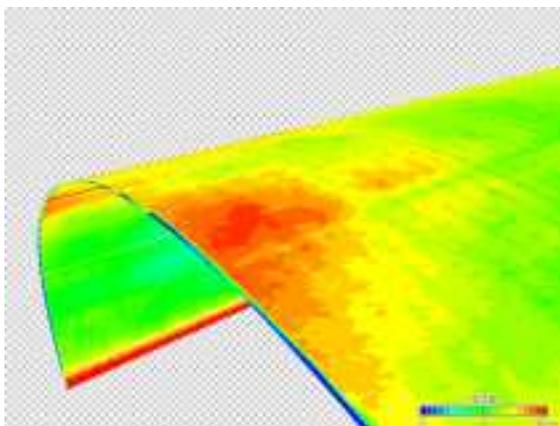
適切な教師データによるAI学習 (変状, 展開図, 判定をセットにして属性付与)

デジタルツイン



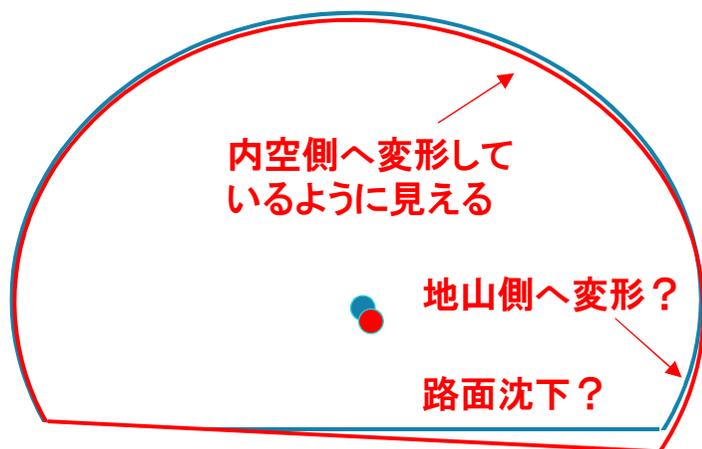
データベース活用方法の検討

コンター表示変形モード解析, 進行性差分解析

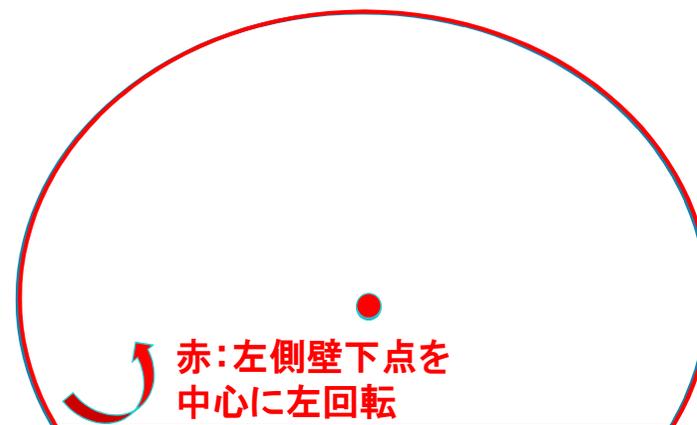


誤差を適正化した高度解析技術による変形評価法の検討

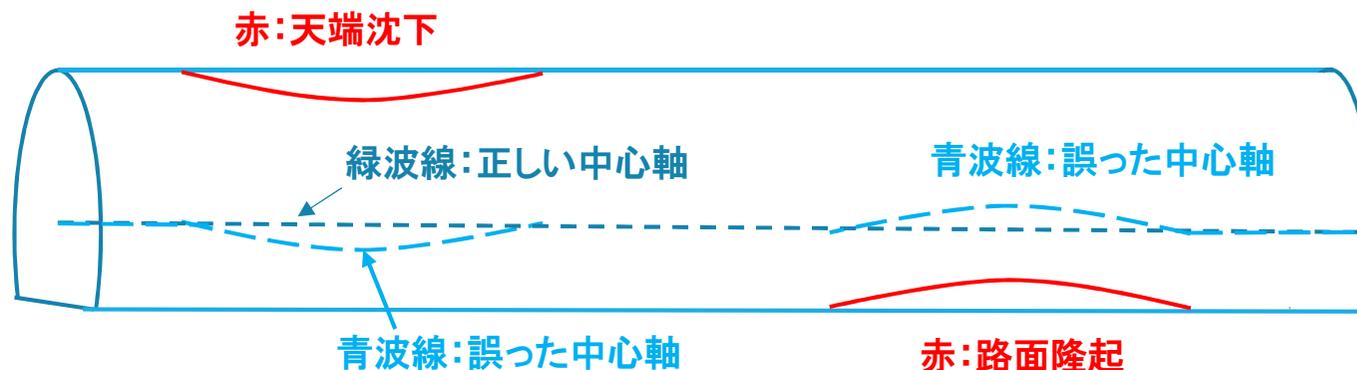
複数計測時の衛星不可視下でのトンネル中心軸、断面回転の課題



緑:1回目計測 赤:2回目計測
計測断面差分を断面変形進行と評価してしまう



緑:1回目計測 赤:2回目計測
2回目回転補正すると完全に同じ断面となり
実際には断面変形、進行性はない



天端沈下、路面隆起(沈下)などの影響を受け、中心軸を誤ってしまう。2回計測の正しい重ね合わせができない。正しい変形進行性が評価できない。

設計～施工～維持管理に関わる生産性の 向上を目的として各種データの管理

■ i-Constructionへの応用

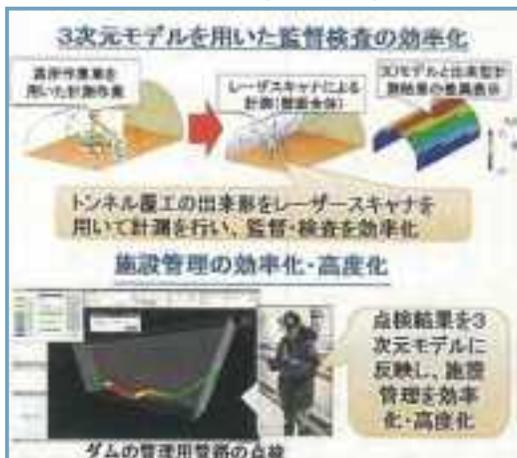
➤ トンネル工事や維持管理に ICT技術の活用を拡大

調査・設計・施工・維持管理の各
プロセスで3次元モデルを導入

- ◆ 出来型計測, 点検記録, 損傷図
- ◆ 断面初期値, 進行性診断
- ◆ 既往断面復元, 覆工厚・空洞再現

➤ 3Dデータの利活用促進

- ◆ レーザ点群, 画像, 損傷図など3D化:VR



国交省 i-Construction HPより

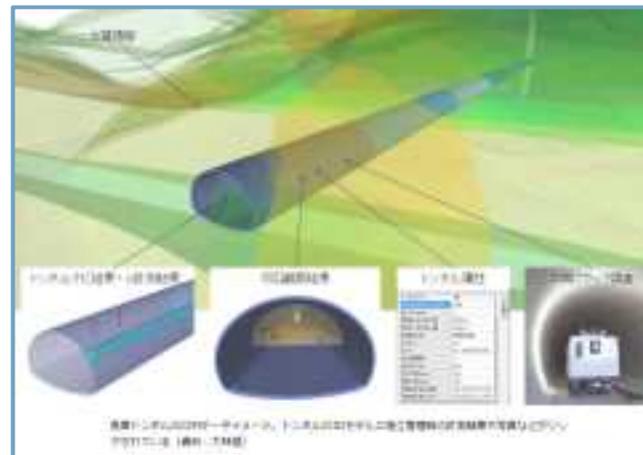
■ CIMへの応用

➤ トンネル計測（レーザ, 画像）に よる3Dモデリング

- ◆ 施設管理図, 点検, 損傷, 対策履歴管理
- ◆ 調査・設計・施工記録DB
- ◆ CIM情報化施工（切羽, 地山, 支保, 変状）

➤ 地上・地下構造物, 地下埋, 杭な どを含む3Dモデリング

- ◆ MMSによる地上・地下を統合した3Dマッピング



維持管理に！大林組がトンネル工事のCIMモデルを電子納品
(日経2015/08/05)



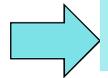
MIMM-Rによる竣工時計測

今後の方向性 (点検要領改訂)

道路トンネル定期点検の今後の方向性 (2巡目の動向)

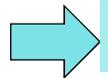
1巡目の点検を踏まえた効率化・合理化

- ・ 損傷、構造特性に応じた点検の着目箇所の特定化による点検の合理化

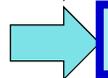


- ・ 支援技術によるスクリーニングにより打音・触診箇所の明確化

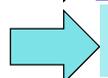
- ・ 適切な健全性診断の実施



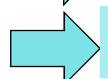
- ・ 点検支援新技術の利活用、健全性診断に資する情報の明確化



- ・ 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



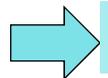
- ・ 覆工巻厚変状に背面空洞も考慮



- ・ 付属物診断の重要性（落下に繋がる可能性、取付部材の腐食）

点検支援技術の積極的な活用

- ・ 近接目視の補完・代替・充実する技術の活用



- ・ 活用範囲、精度、運用方法の明確化



定期点検の質の確保、向上

研究により期待される具体的な成果

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

➡ 専門技術者不足の対応， 損傷原因の特定力の向上

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

➡ 点検調書等の作成時間の短縮， 診断の確実性と時間の短縮

③i-Construction推進に向けたトンネルデータベースの有効活用検討

➡ 損傷原因の特定が早期に可能となり， より確実な診断が可能と時間短縮につながる

今年度の方向性

トンネル点検技術の高度化に関する今後の研究方針
(Point1：各判定の目安に対する支援内容の検証結果と課題表) に従い検討を進める計画である。

H26年度に制定された道路トンネル定期点検要領にて運用されて5年が経過し、新たな点検要領が改訂された。改訂のポイントは、① 1巡目の点検を踏まえた効率化・合理化、② 点検支援技術の積極的な活用である。

本研究では、要領改訂の方針を受け、点検支援技術をいかに高度化して健全性診断に活用するかを第一の研究ポイントにしたうえで、AI、デジタルツインなど新技術の活用も踏まえ、一層効率的で合理的なスマートインフラマネジメント手法の確立に向け取り組んでいく。

今年度の検討内容

- ①変形モード解析の差分解析の妥当性検証
 - ✓MIMMのレーザ一点群の精度（横断計測精度）
 - ✓衛生不可視下におけるSLAM適用による計測精度の向上
 - ✓変形モード解析による進行性評価（差分解析手法）の妥当性、精度の検証

- ②AIを活用した現地点検の着目箇所抽出
 - ✓展開画像に基づく教師データの作成
 - ✓適用するAI手法の検討
 - ✓点検着目箇所の抽出AIの試行