

2. 4 鉄道総研の取り組み

『鉄道橋の維持管理におけるDXの取り組み』

池田 学

(公財) 鉄道総合技術研究所

鉄道力学研究部 構造力学研究室長

鉄道橋の維持管理におけるDXの取り組み ～維持管理がDXでどう変わる？どう変える？～

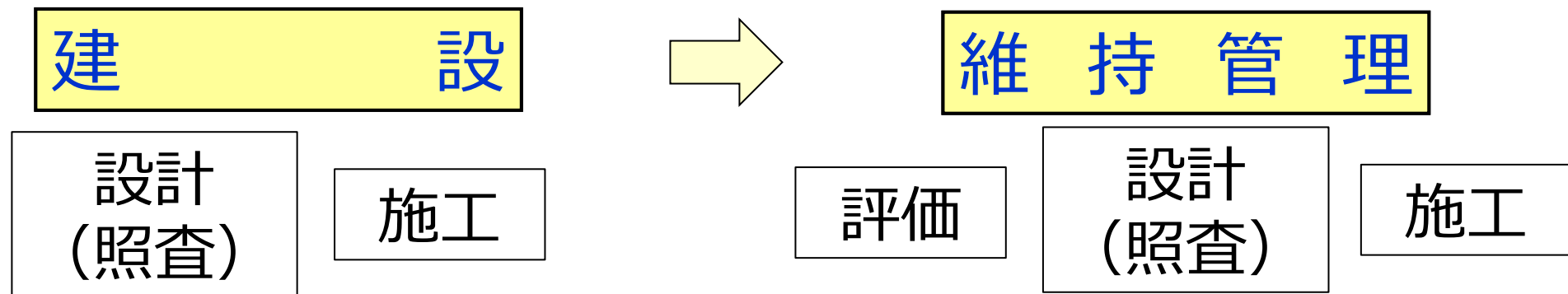
(公財) 鉄道総合技術研究所

池田 学



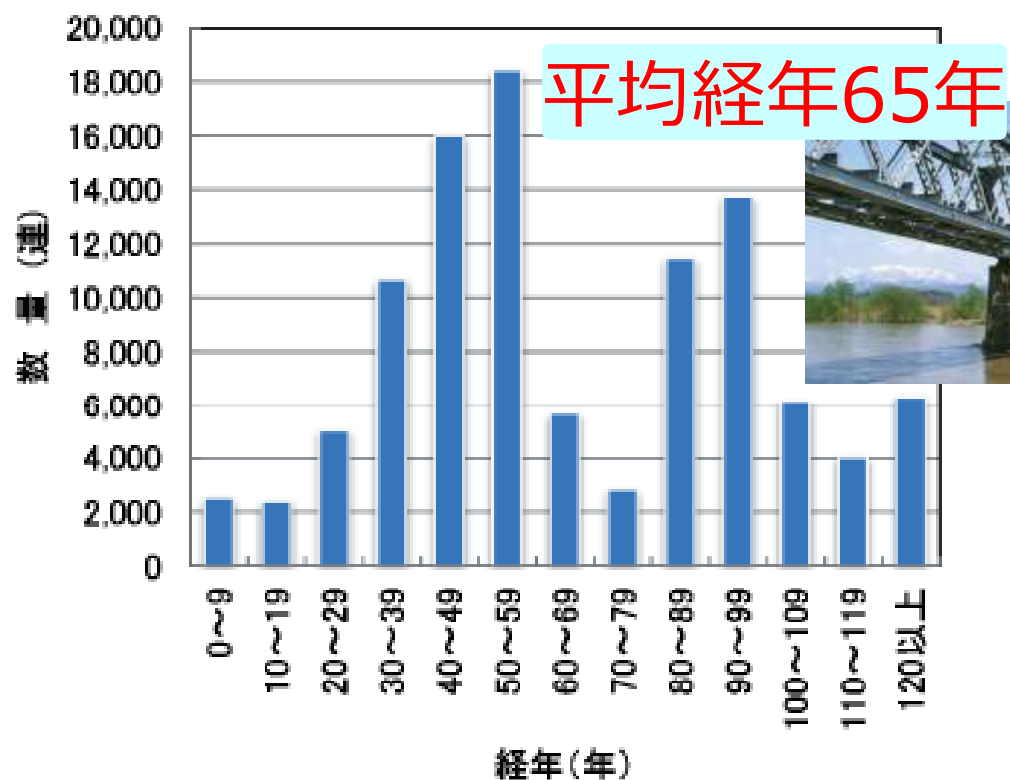
はじめに

- 鉄道橋の維持管理を対象
主として鋼橋を対象とするが、コンクリート橋も含む。
(鋼橋に適用可能な技術)
- 対象とするDXは、「デジタル技術の活用により、維持管理業務の効率化、構造物の性能向上が期待される技術」とする。

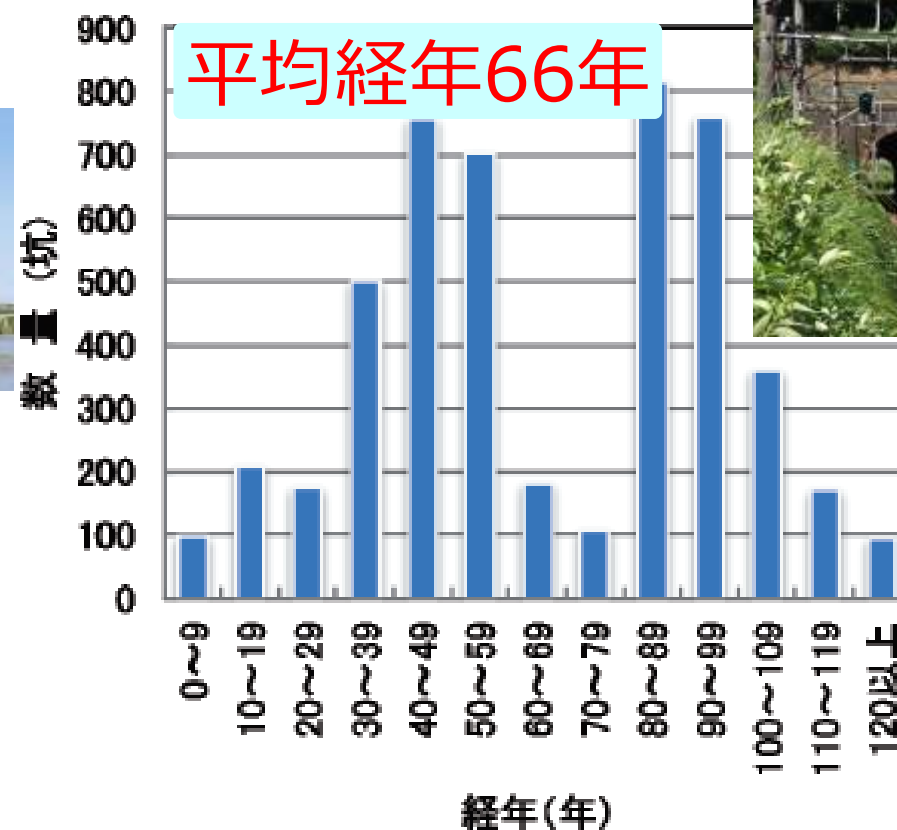


はじめに

鉄道施設の経年分布（橋りょう・トンネル）



橋梁



トンネル

鉄道施設は高経年構造物が非常に多い

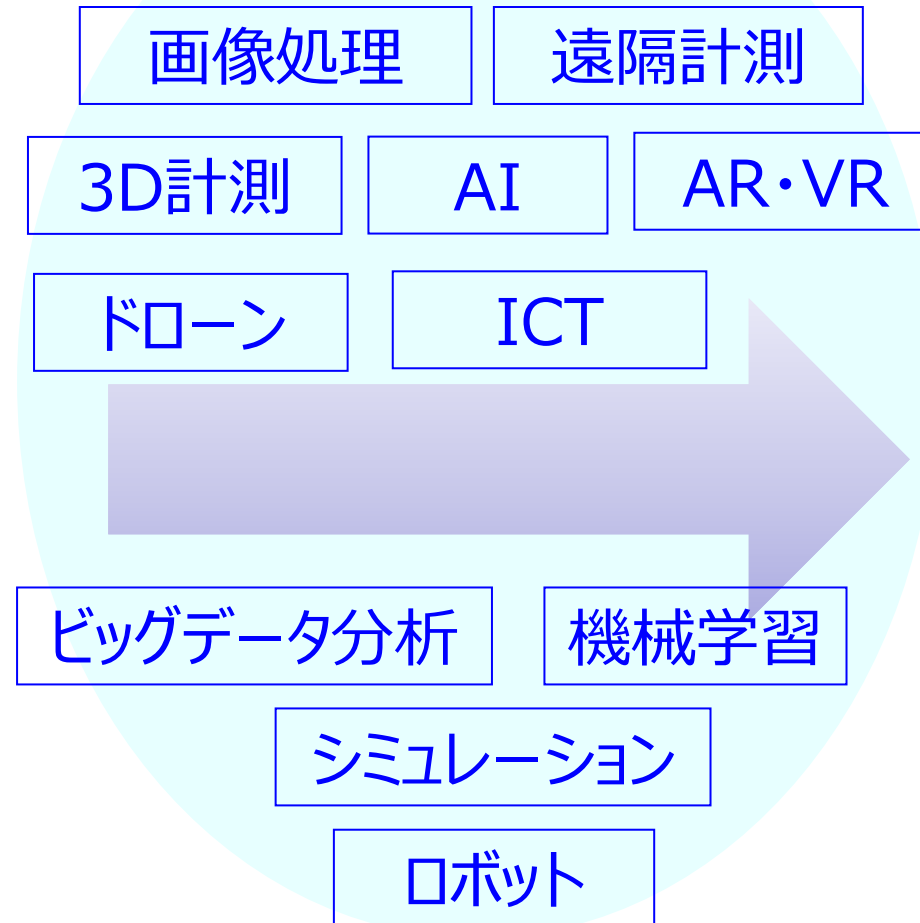


はじめに

DX技術の活用

課題

- 構造物の高齢化・老朽構造物の増加
→維持管理費増大
- 少子高齢化社会
→技術者（特にベテラン技術者）の減少
- 鉄道運輸収入減
→インフラ整備費の制約



目標

- 構造物の長寿命化
- 維持管理の効率化
- 維持管理コスト縮減
 - －検査業務の省力化・省人化
 - －計画的な維持管理（高精度評価（高度化）による補修・補強等の適正化）
 - －補修・補強等の施工の省力化 ※ここでは省略
- 技術者の安全性向上

内 容

1. 鉄道橋の維持管理の体系
2. 鉄道総研における開発事例
3. 鉄道事業者における開発事例（一部の紹介）
4. 維持管理へのDX活用のための検討課題と
将来の方向性

1.1 鉄道に関する技術上の基準を定める省令

第九章 施設及び車両の保全

第87条 施設及び車両の保全

線路及び列車等を運転するための電気設備（以下「電力設備」という。）は、列車等が所定の速度で安全に運転することができる状態に保持しなければならない。

※構造物及び軌道の保全については、「**鉄道構造物等維持管理標準**」による。

第88条 新設した施設又は新製した車両等の検査及び試運転

第89条 本線及び本線上に設ける電車路線の巡視及び監視並びに列車の検査

第90条 施設及び車両の定期検査

施設及び車両の定期検査は、その種類、構造その他使用の状況に応じ、検査の周期、対象とする部位及び方法を定めなければならない。

2 前項の定期検査に関する事項は、国土交通大臣が告示で定めたときは、これに従って行われなければならない。

第91条 記録



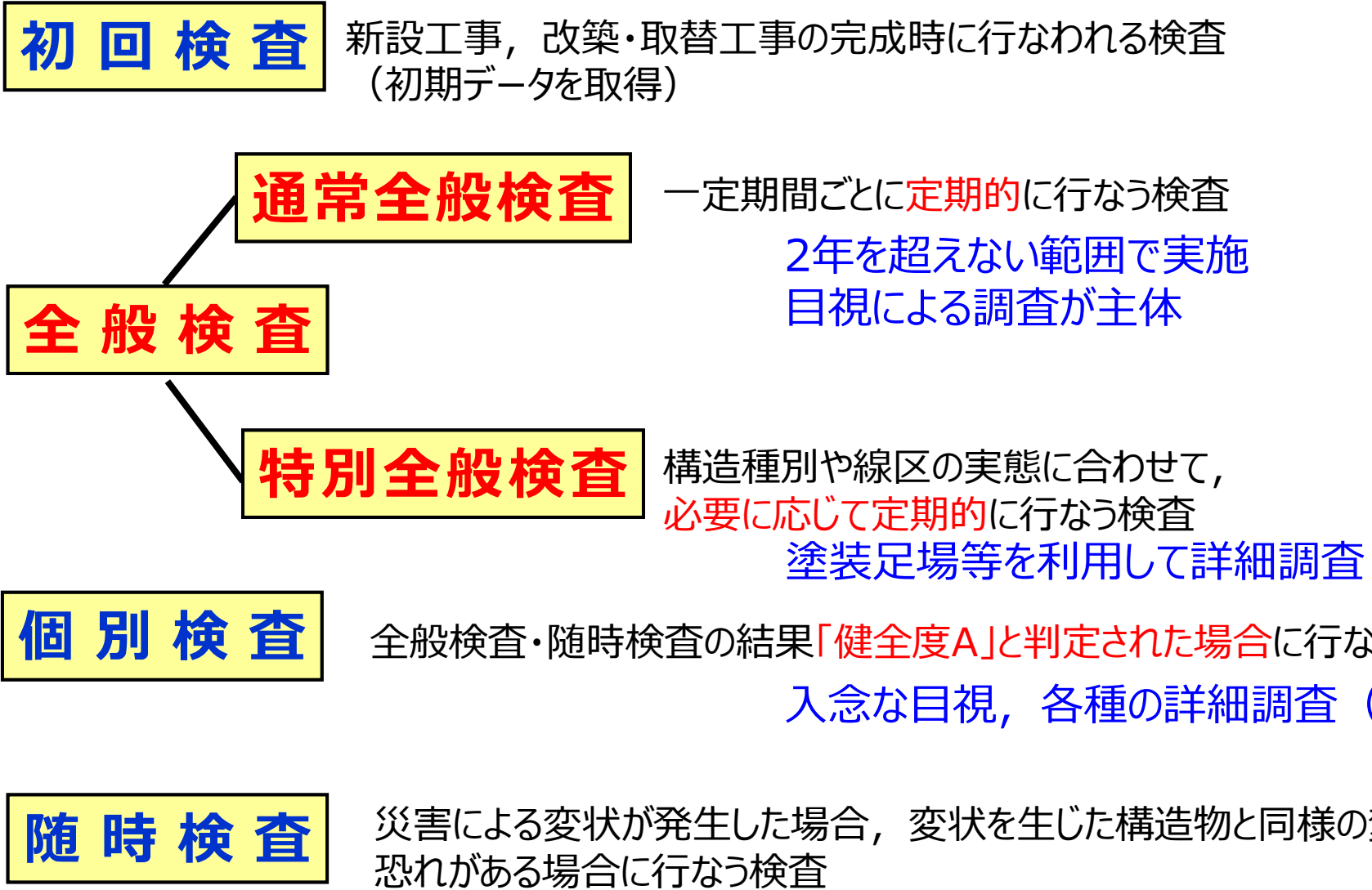
1.2 鉄道構造物等維持管理標準・同解説



鉄道構造物等維持管理標準・同解説



1.3 検査の区分



1.4 検査周期

国土交通省 告示

第二条（線路の定期検査）

鉄道の種類	施設の種類の種類	基準期間	許容期間
新幹線鉄道以外の鉄道	軌道	一年	一月
	橋りょう, トンネルその他の構造物	二年	一月
新幹線鉄道	軌道（普通鉄道の本線の軌間, 水準, 高低, 通り及び平面性に限る.）	二月	十四日
	軌道	一年	一月
	橋りょう, トンネルその他の構造物	二年	一月

3 （**周期の短縮あるいは延伸が可能**） **※延伸**についてはのちほど紹介

4 **トンネル**については、・・（略）・・，新幹線鉄道にあっては、十年を超えない期間ごとに、新幹線鉄道以外の鉄道にあっては、二十年を超えない期間ごとに詳細な検査を行わなければならない。



1.5 構造物の健全度判定

構造物の健全度をA～Sで判定

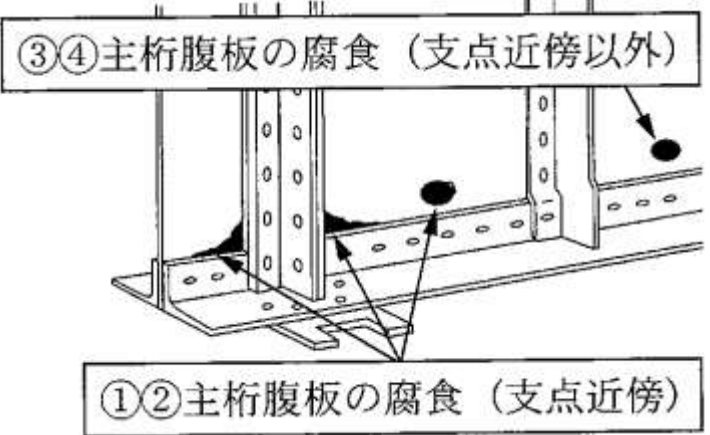
低
↑
健全度
↓
高

健全度		運転保安, 旅客および公衆 などの安全に対する影響	変状の程度	措置
A	AA	危険	重大	緊急に措置
	A1	早晚脅かす 異常外力を受けた時 危険	進行中の変状等があり, 性能低下も進行している	早急に措置
	A2	将来脅かす	性能低下の恐れがある 変状等がある	必要な時期に措置
B		進行すれば健全度Aになる	進行すれば健全度Aになる	監視 (必要に応じて)
C		現状では影響なし	軽微	なし
S		影響なし	なし	なし



1.5 構造物の健全度判定

変状に対する健全度判定の一例 「鉄道構造物等維持管理標準（鋼・合成構造物）」

部材	変状例	判定基準	判定例
主桁	<p>・主桁腹板</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ① 支点近傍で連続的に腐食したもの ② 支点近傍で局部的に孔食したもの ③ 支点近傍以外で連続的に腐食したもの ④ 支点近傍以外で局部的に孔食したもの 	<ul style="list-style-type: none"> A1 A2 (B) A2 (B) B (C)



実績のある確立された方法
目視のみでなく定量評価からも判定可



1.6 構造物の維持管理における課題（DX導入の観点）

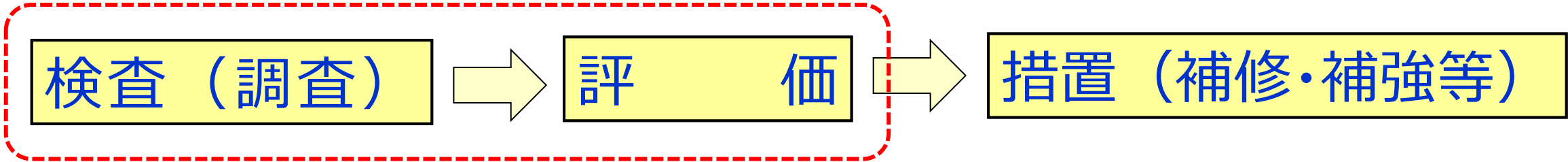
- 検査に**多大な労力**（全般検査のみでなく、個別検査も含めた検査全体）
- 全般検査で目視困難箇所への調査，高所・狭隘箇所への調査の安全性確保
- 効率的な維持管理のための**詳細な調査や評価の活用方法**
- 措置の判断や適正化のために**より高精度な構造性能評価や劣化予測が必要**（グレーディング評価から，より定量的な評価へ）
- **TBM（時間基準保全）からCBM（状態基準保全）へのシフトの方法**

内 容

1. 鉄道橋の維持管理の体系
2. 鉄道総研における開発事例
3. 鉄道事業者における開発事例（一部の紹介）
4. 維持管理へのDX活用のための検討課題と
将来の方向性

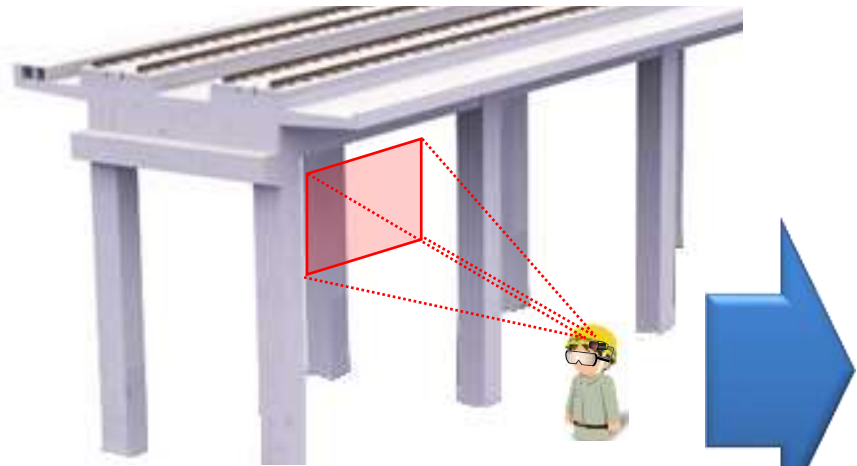
2. 鉄道総研における開発事例

- 3次元画像計測技術による構造物の目視検査支援 目視検査
- ビデオカメラによる橋梁の列車通過時挙動の画像計測 調査
- ドローンによる橋梁の検査 調査
- 車上計測による橋梁の性能評価（共振橋梁の検知，桁たわみの推定等） 評価
- 橋梁の加速度モニタリングによる性能評価 評価

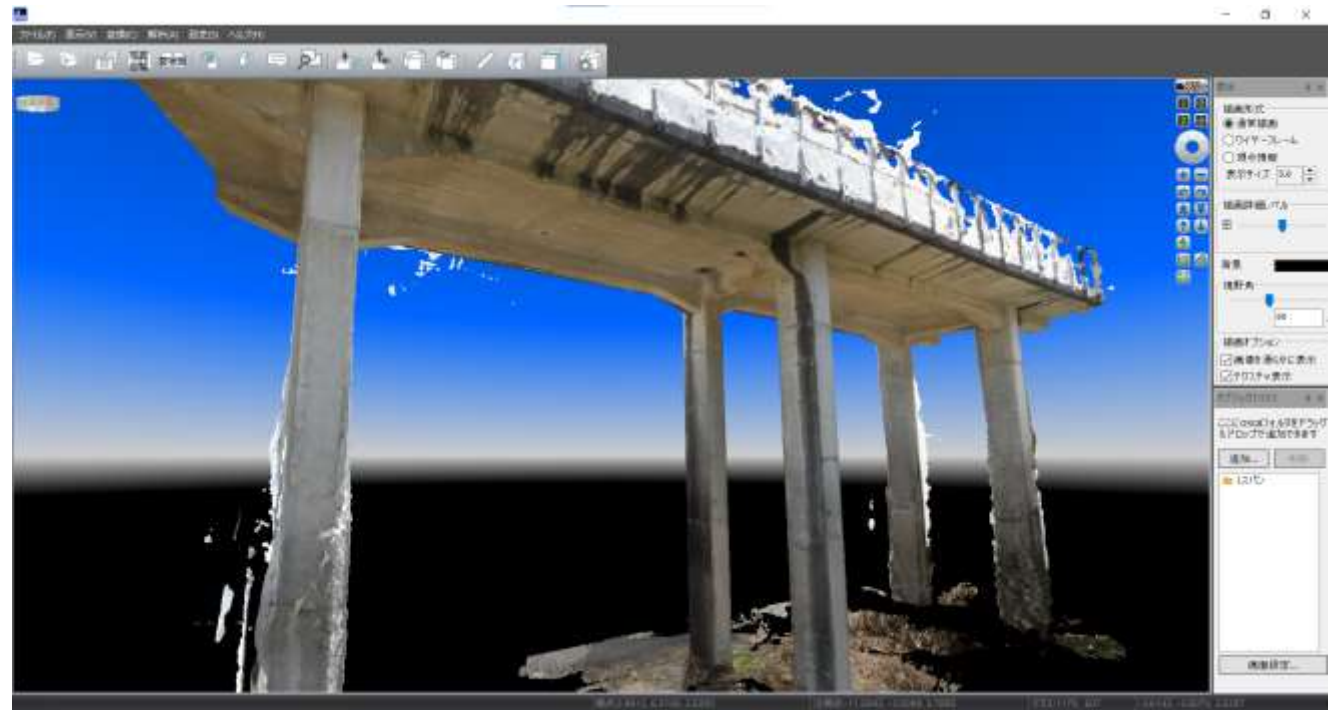


2.1 3次元画像計測技術による構造物の目視検査支援

- 現状：目視で検査し，主に抽出した変状箇所のみ写真とコメントを記録
- 概要：
 - 検査時に撮影した2次元画像から，3次元画像を半自動で生成
 - 構造物の状態や周辺環境をいつでも直感的に確認できる



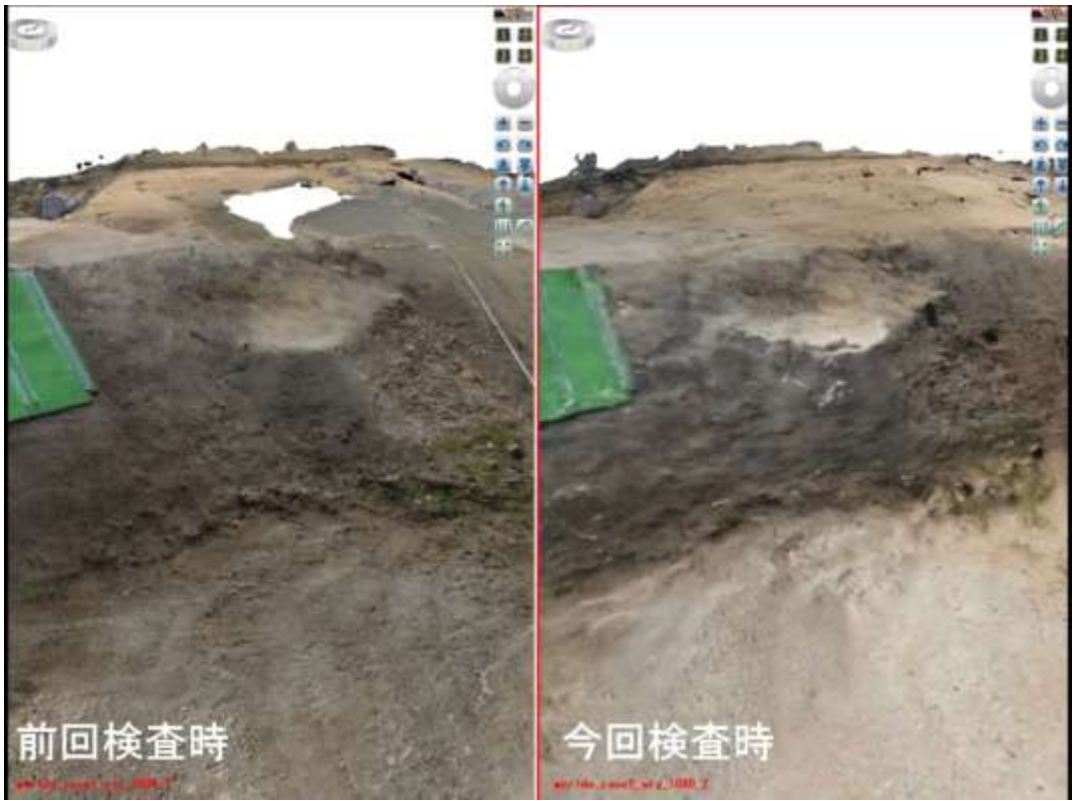
ウェアラブルカメラで
2次元画像
を撮影



SfM(Structure from Motion)で3次元画像を生成

2.1 3次元画像計測技術による構造物の目視検査支援

検査時期の異なる画像の比較



- ・変状の抽出が容易
- ・形状の変化も確認可

検査精度向上

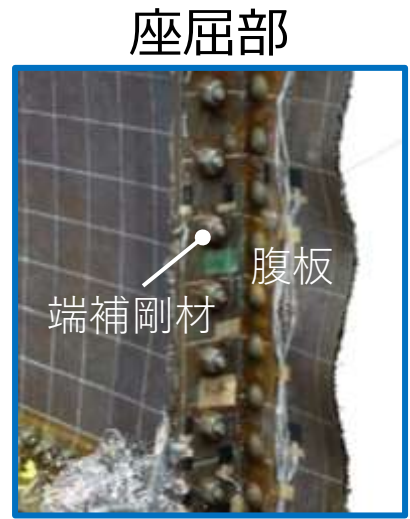
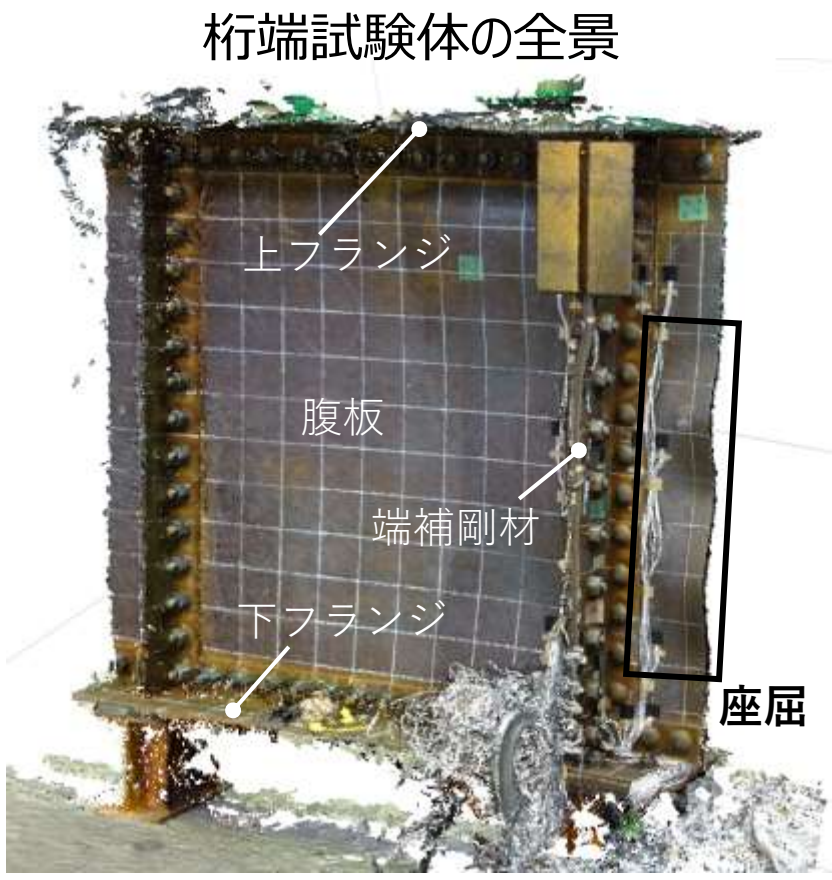
指定部位の画像抽出，検査台帳の作成



2.1 3次元画像計測技術による構造物の目視検査支援

鋼桁－桁端部試験体（座屈試験）への試行例

⇒ 3次元画像の生成に適した方法で撮影



- ・端部腹板の座屈形状を再現
- ・高力ボルトの状態も確認可

➡ 複雑な形状でも
詳細に画像を取得すれば
3次元画像は生成可能

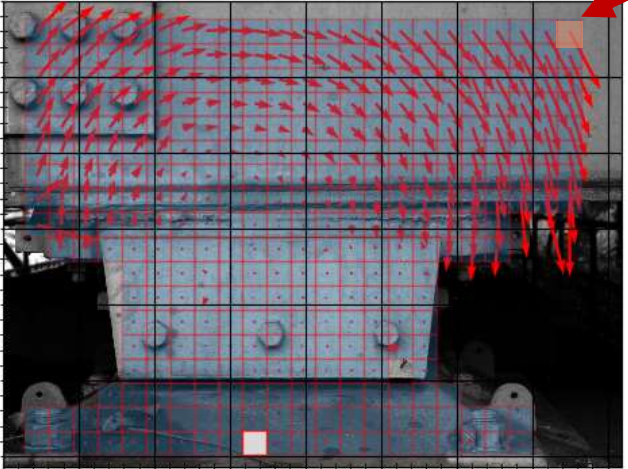


2.2 ビデオカメラによる橋梁の列車通過時挙動の画像計測

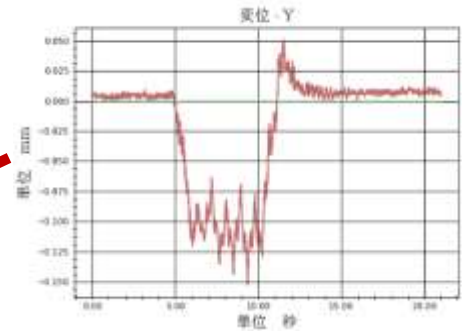
- 課題：計測の労力大，危険な高所作業，アクセス困難箇所，全体変形挙動不明
- 概要：画像計測による橋梁の列車通過時の挙動



- ビデオカメラの動的画像を処理して橋梁の変位・変形挙動を可視化
- 着目点の変位及び全体変形挙動の把握



鋼製支承の変形



トラス橋の変形

検査の安全性向上・効率化・高度化



2.3 ドローンによる橋梁の検査

- 課題：計測の労力大，危険な高所作業，接近困難箇所
- 概要：ドローンが構造物下面・側面に付着走行して，近接画像撮影，各種検査実施

- ・鉄筋探査，かぶり測定
- ・打音検査 → 打音データをもとにAIで変状判定
- ・近接撮影画像 → AIによるひび割れ検出・ひび割れ幅の推定



付着走行(側面)



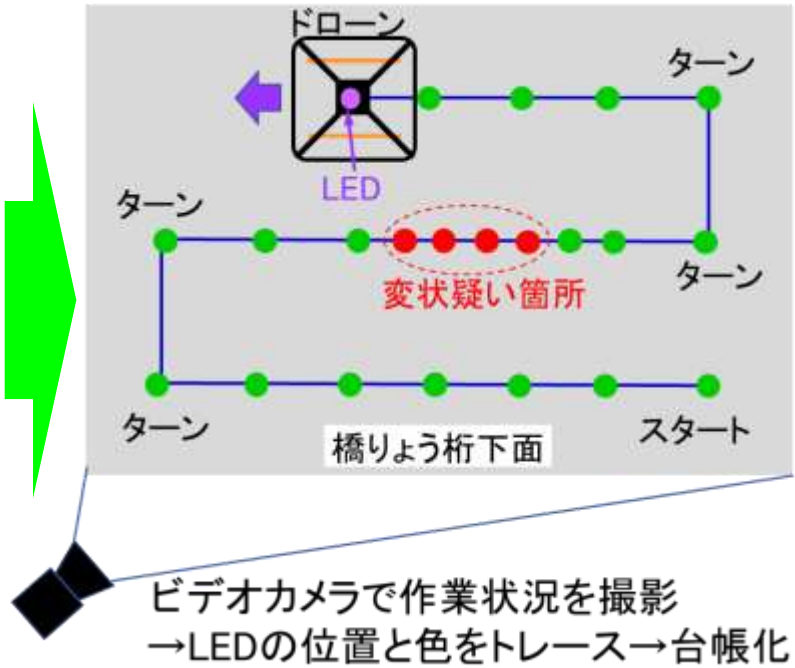
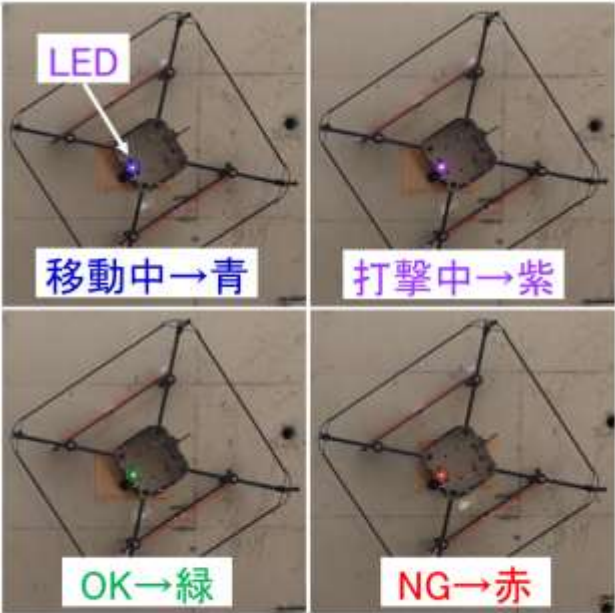
付着走行(下面)



構造物検査の安全性向上・効率化・高度化

2.3 ドローンによる橋梁の検査

- 概要：ドローンが構造物下面・側面に付着走行して、近接画像撮影、各種検査実施
 - ・打音検査 → 打音データをもとにAIで変状判定



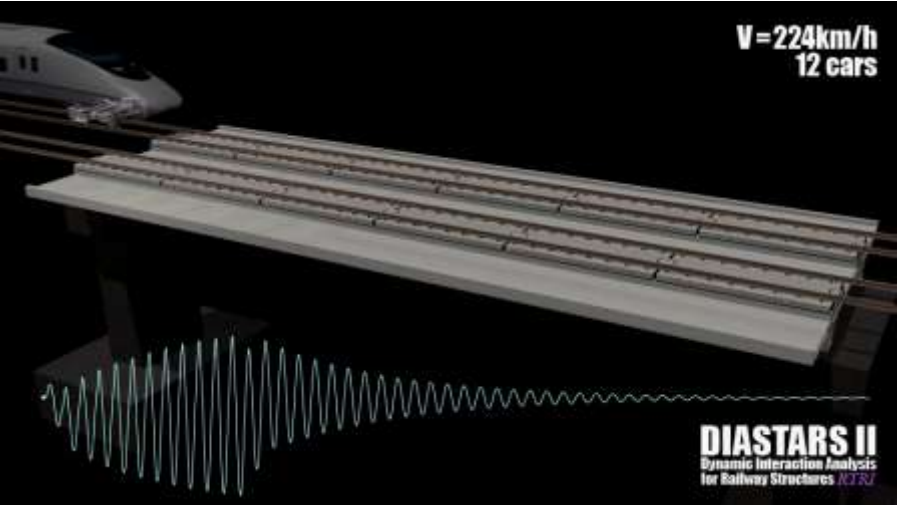
検査の安全性向上・効率化・高度化



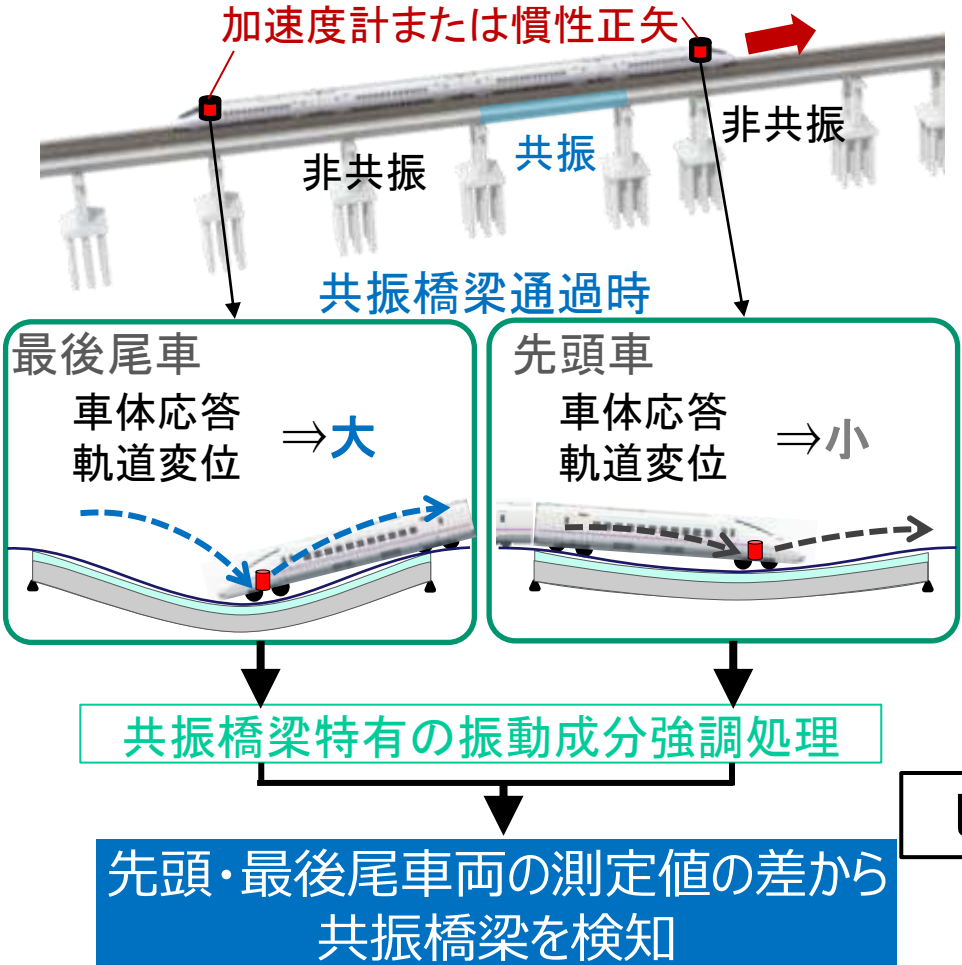
2.4 車上計測による橋梁の性能評価

- 課題：地上計測の労力大
- 概要：車上計測データ（上下加速度または軌道変位）を活用し、共振橋梁を検知

共振橋梁

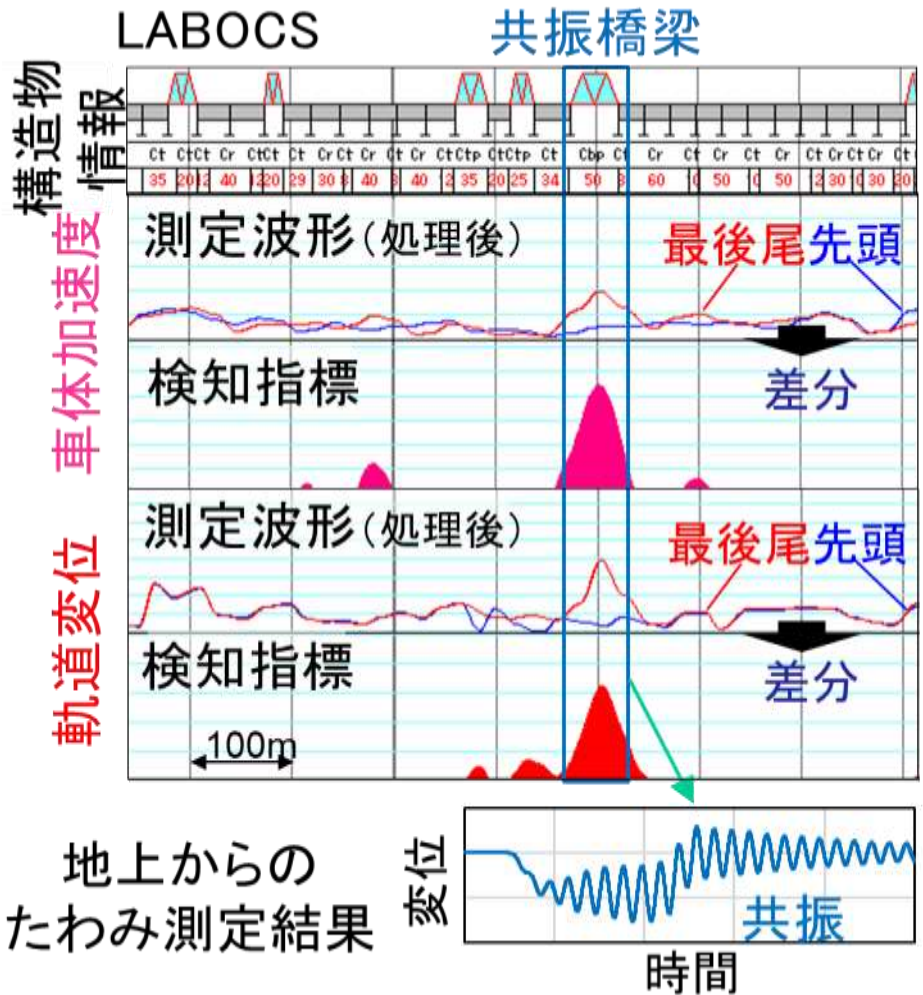
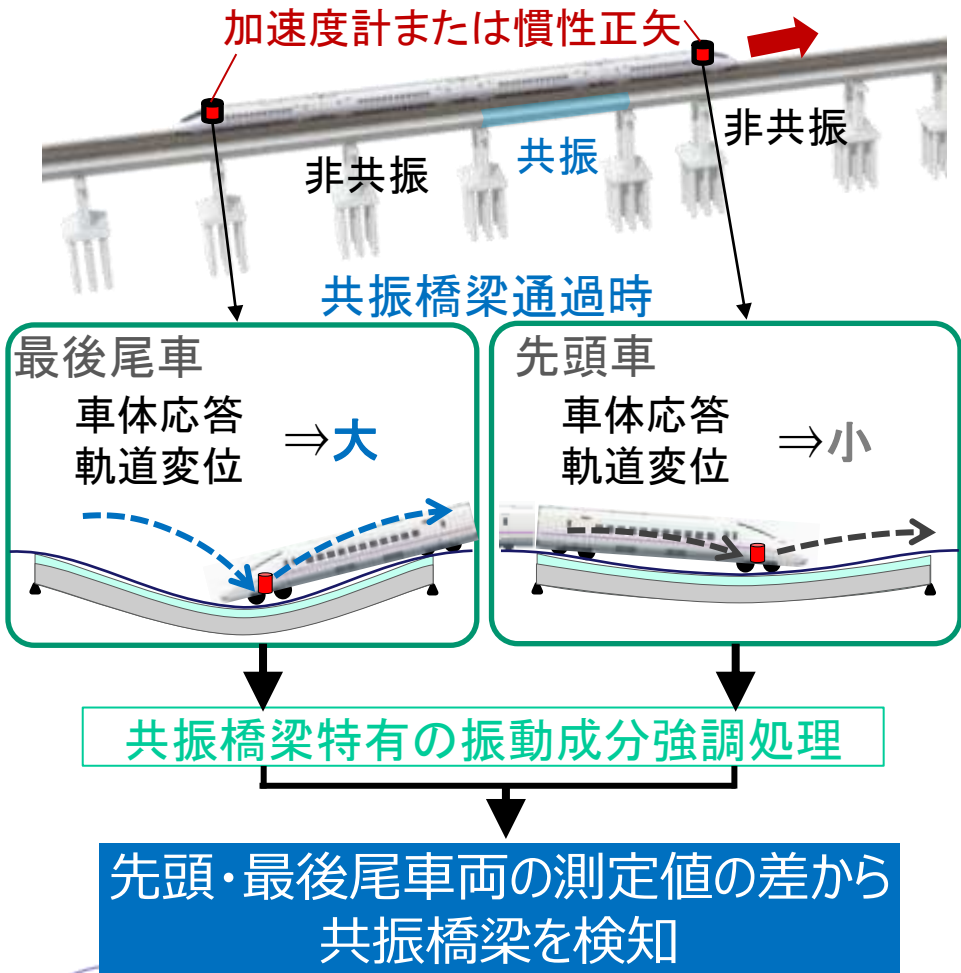


検査の効率化（地上計測の省力化）
 ※電力設備の要注意箇所抽出にも活用



2.4 車上計測による橋梁の性能評価

■ 概要：車上計測データ（上下加速度または軌道変位）を活用し、共振橋梁を検知



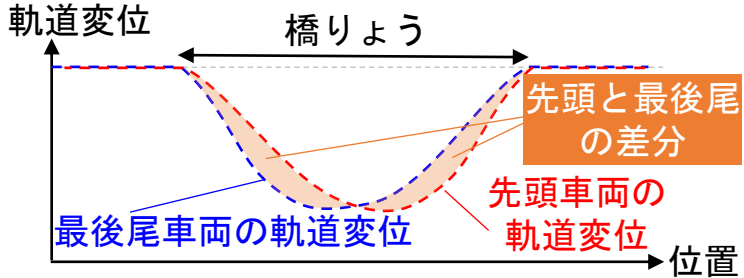
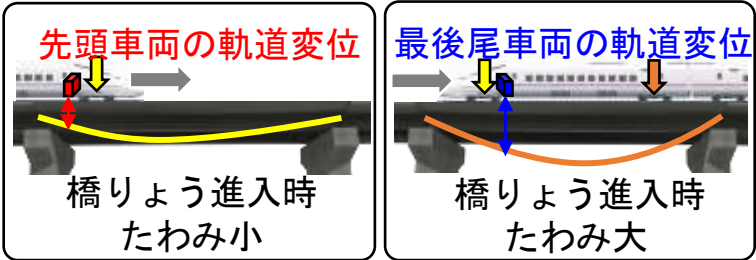
実際に共振を確認
→提案手法の妥当性検証



2.4 車上計測による橋梁の性能評価

- 課題：地上計測（桁たわみ計測）の労力大
- 概要：車上計測データ（軌道変位）を活用し，桁のたわみの推定

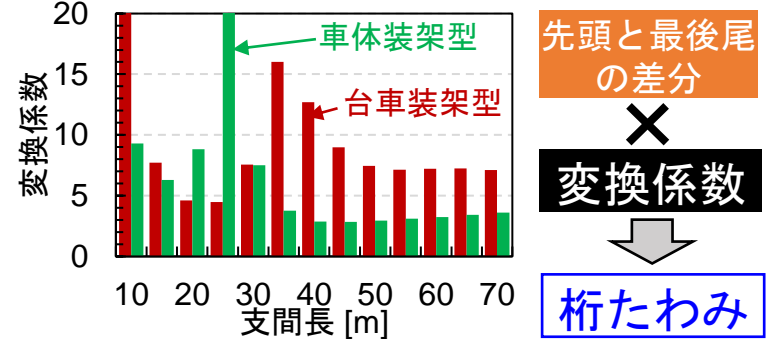
車上からのたわみ検出原理



両先頭で桁への荷重条件が違う
 ↓
 桁たわみの違いが
 両先頭の軌道変位の差分を生成

変換係数による推定法

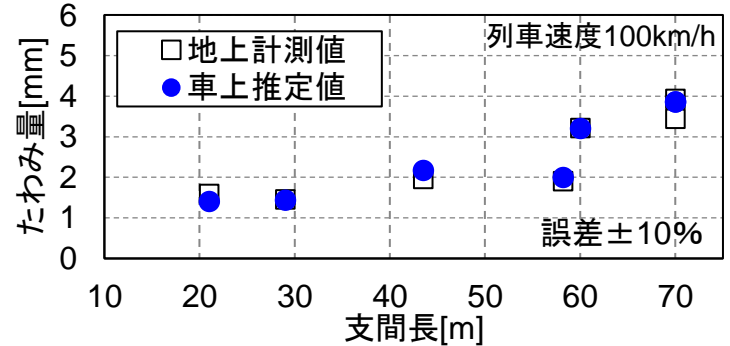
理論解析で差分→桁たわみ
 変換係数を算出



変換係数は桁曲げ剛性・荷重に
 依存しない

差分により静的軌道変位を除去

実路線での検証



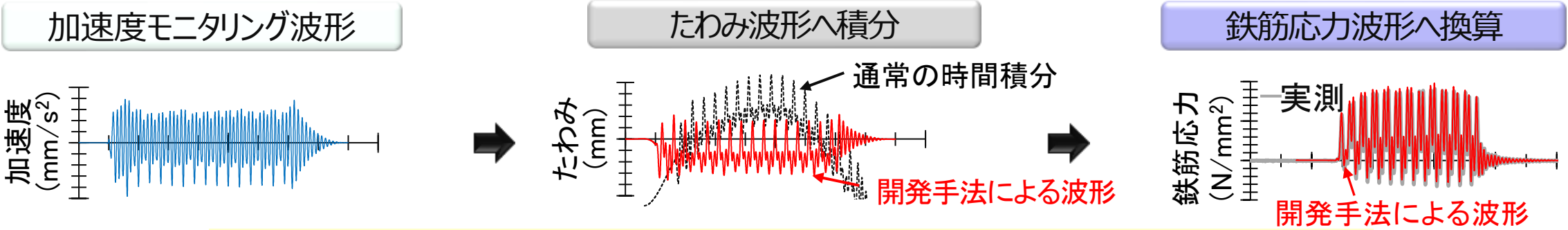
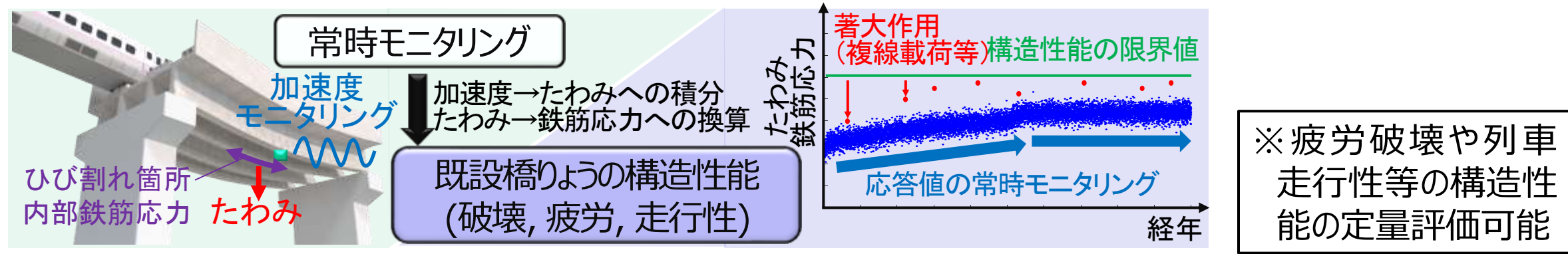
- ・列車速度100km/h程度まで
- ・種々の桁形式や高速域について検討中

検査の効率化
 (地上計測の省力化)



2.5 橋梁の加速度モニタリングによる性能評価

- 課題：性能評価が困難，危険な高所作業，接近困難箇所
- 概要：簡易な加速度モニタリングに基づき，コンクリート橋のたわみ，鉄筋応力をリアルタイムで高精度に推定できるアルゴリズムを開発

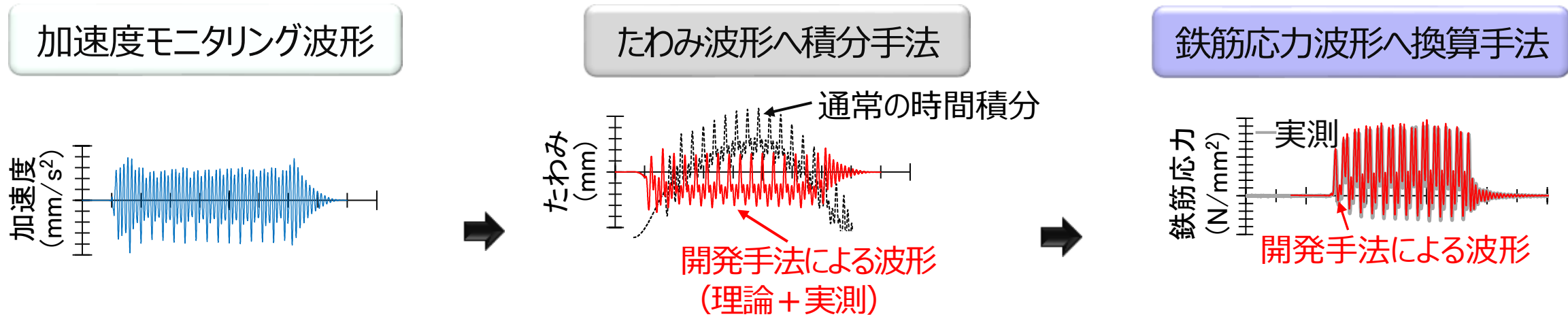


検査の高度化，構造物の長寿命化，補修・補強の効率化



2.5 橋梁の加速度モニタリングによる性能評価

- 概要：簡易な加速度モニタリングに基づき、コンクリート橋のたわみ、鉄筋応力をリアルタイムで高精度に推定できるアルゴリズムを開発



- 従来は加速度の絶対値や固有振動数の変化による相対評価

- 超高速, 高精度なたわみ積分手法
- たわみにより乗り心地, 走行安全性の評価を実現

- 鉄筋応力により破壊, 疲労破壊の評価を実現
- 疲労寿命の定量評価

※鋼橋にも応用可能

検査の高度化, 構造物の長寿命化, 補修・補強の効率化



内 容

1. 鉄道橋の維持管理の体系
2. 鉄道総研における開発事例
3. 鉄道事業者における開発事例（一部の紹介）
4. 維持管理へのDX活用のための検討課題と
将来の方向性

3. 鉄道事業者における開発事例（一部の紹介）

鋼橋疲労き裂検知システム（JR東海）

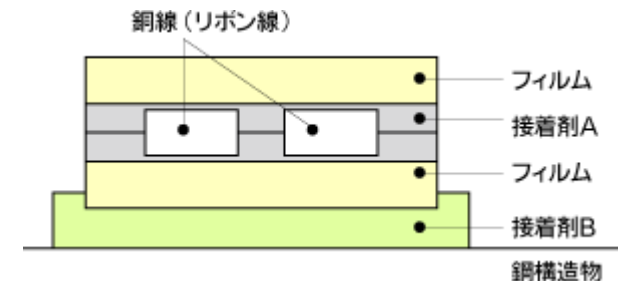
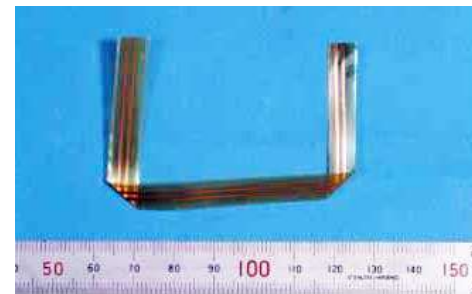


破断検知線の特長

- 母材に疲労き裂が発生する早期の段階で検出可能
※破断検出時のき裂通過長さが約5mm以下
- 鋼構造物の一般塗装の上に貼り付け可能
- 塗り替え期間（約10年）の耐久性を有する
- 折返し貼り付け可能で、多少手荒く扱っても切れない強度を有する

破断検知線の構造

- 2本の平行銅線を特殊フィルムでサンドイッチした構造
- 幅7mm, 厚さ0.1mmで鋼材面や塗装面への良好な接着性を確保



3. 鉄道事業者における開発事例 (一部の紹介)

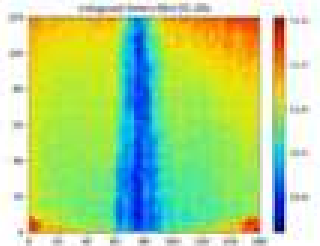
小型ドローンを用いた狭隘箇所調査 (JR東日本)

新型ドローンを開発し、暗所・狭小空間での飛行を確認



新型ドローン「IBIS2」

機体寸法	194mm × 198.5mm × 58mm
機体重量	243g(機体:150g、バッテリー 93g)
飛行時間	最大 11 分
搭載重量	最大 40g
装着カメラ	暗所に強い高感度・超広角カメラ
装着ライト	強力 LED ライト 2 基(5 段階調光)
その他	防水・防塵性能を有し、 -5°C~60°Cまで飛行可能



暗所での撮影画像(左)と赤外線サーモグラフィ(右)



狭小空間での飛行状況(撮影協力:日本リーテック(株))

※CalTa, Liberaware, JR東日本コンサルタンツの共同で開発
<https://drone-journal.impress.co.jp/docs/news/1185247.html>



3. 鉄道事業者における開発事例（一部の紹介）

小型ドローンを用いた狭隘箇所調査（JR東海）

マイクロドローンを用いて駅構内吊り天井内部の鋼桁の支承の調査が可能であることを検証

新大阪駅構内 天井裏の状況 ※マイクロドローンにて撮影	沓の撮影写真 ※マイクロドローンにて撮影
 <p>天井内は電気ケーブルや配管などにより人が進入して調査対象まで近づくことが難しい</p>	 <p>明瞭に沓の状態が確認でき、目視点検と同程度に健全度を図ることが可能と判定</p>



内 容

1. 鉄道橋の維持管理の体系
2. 鉄道総研における開発事例
3. 鉄道事業者における開発事例（一部の紹介）
4. 維持管理へのDX活用のための検討課題と
将来の方向性

4.1 今のままで維持管理の効率化が図れるか？

本来は、DX技術の導入 → 維持管理の効率化 となるはず

今のまま技術開発を継続すれば変わるか？

- 作業の省力化・効率化になっている？ 業務を増やしていないか？
(過渡期と言われるが、本当？)
- 目視検査・評価の補完？ (ベテラン技術者の代替？)

なぜもっと積極的に導入できないか？

- 現行の維持管理体系におけるDX技術の必要性・導入のメリット
- 個別分野 (部署・分野・事業者) での技術開発
- 判断能力を有する技術者少
- 導入のためのコスト増, 作業量増
- デジタル人材の不足, データの保管・処理が困難 等々

4.2 今後どう変えるべきか？維持管理の効率化を目指して

個々の技術開発の推進のみでなく、導入しやすい枠組み作りも必要

(私見を含む)

- 維持管理体制の変革は難しい。まずは、例えば**全般検査周期延伸の適用**
- **分野横断・連携の強化**（個別技術のみでなく、共通化技術も）
建設/維持管理の連携，分野間連携，事業者間連携 等
- **データの共通化・統一化**，データ分析処理ツール
- 高精度な評価（計測・シミュレーション等）の活用
(BIM/CIM, デジタルツイン等)
- DX技術導入時のメリットの評価方法
- デジタル人材（データサイエンティスト）の育成 等々

4.3 全般検査周期の延伸

通常全般検査周期の延伸の判断例（維持管理標準（鋼・合成構造物））

調査項目	周期延伸の判断例
現在の疲労変状	疲労き裂が発生していないこと。 公称応力が最大値となる位置において、変動振幅応力が疲労限以下であること、または、累積疲労損傷度が限界値以下であること。
支承部の変状	変状がないこと。
荷重履歴	列車通トンが50000MN以下であること。
溶接補修	現場溶接による補修がないこと。
ボルト継手	F11Tボルトの使用がなく、遅れ破壊の可能性がないこと。

検査周期を4年に延伸可

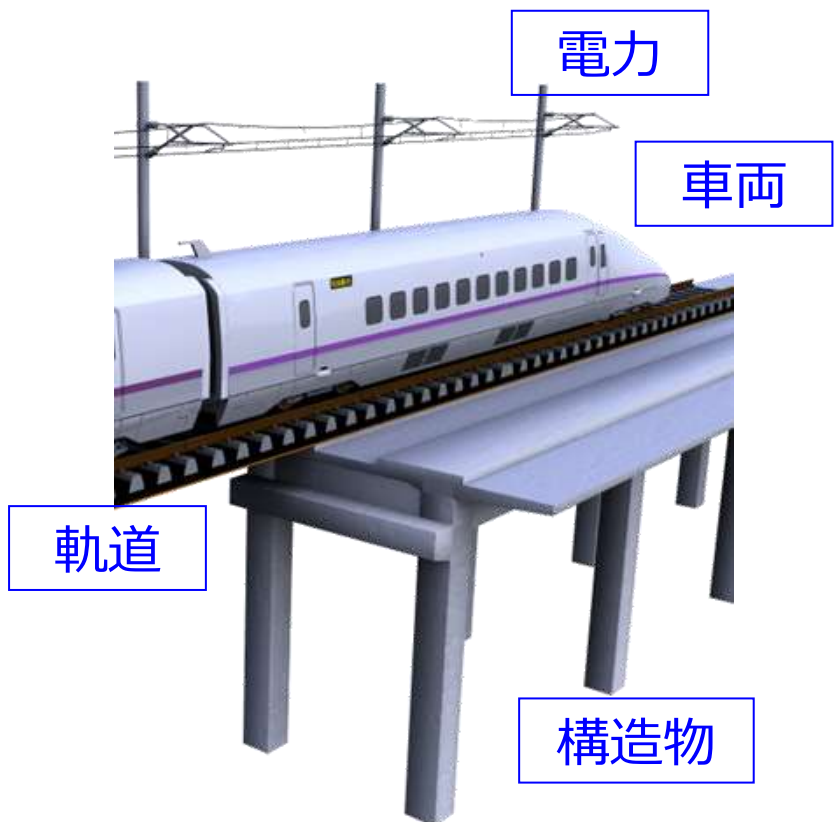
検査の効率化・省力化

しかしながら（ほとんど）適用されていない。
詳細調査・評価，モニタリング活用，異分野連携，
車上計測活用 等々 でもっと適用できないか？

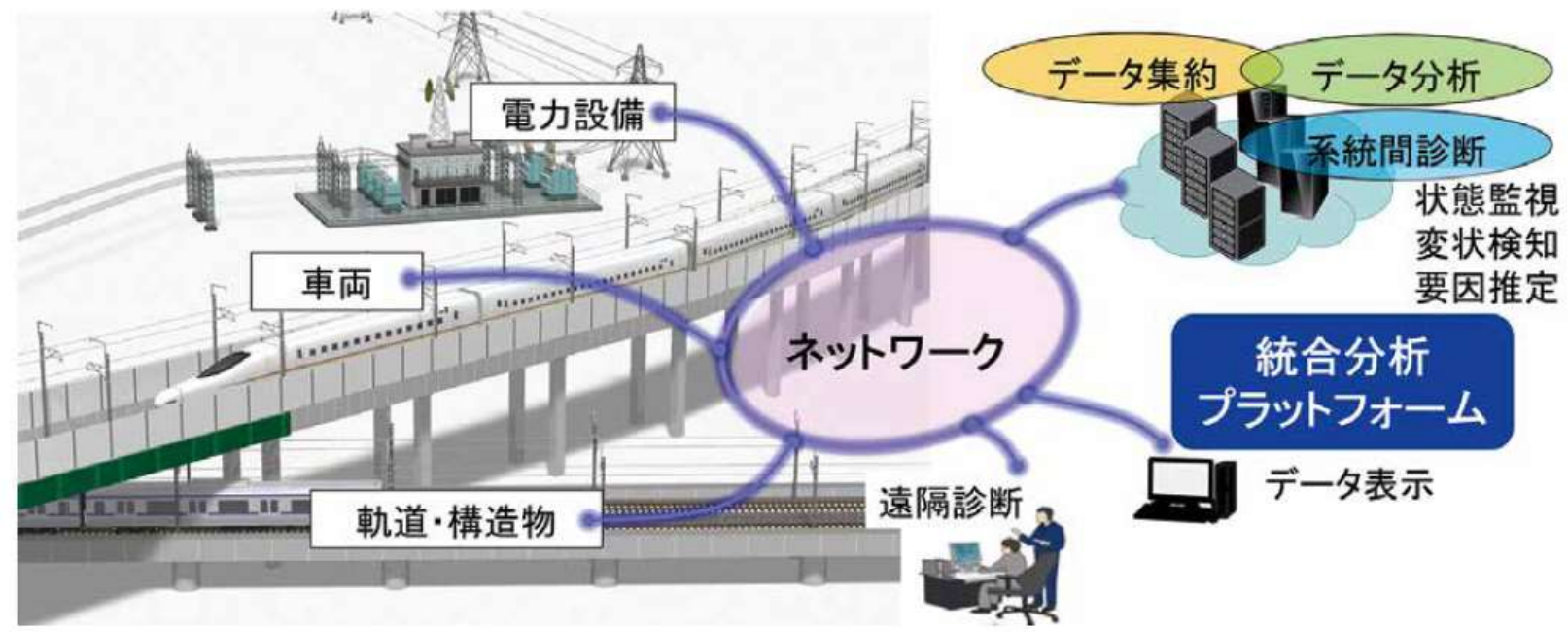
4.4 分野間連携の事例

分野間連携による鉄道設備の維持管理

各種鉄道設備の統合分析プラットフォームの構築



統合分析プラットフォーム



(出典) 神田政幸：軌道・構造物メンテナンスの高度化，第35回鉄道総研講演会，2022.11
<https://www.rtri.or.jp/events/kouen/2022/>



4.4 事業者間連携の事例

ローカル5GとAIを活用した線路巡視（東急電鉄・住友商事）

複数鉄道事業者で線路巡視業務高度化のための共同実証実験



現状

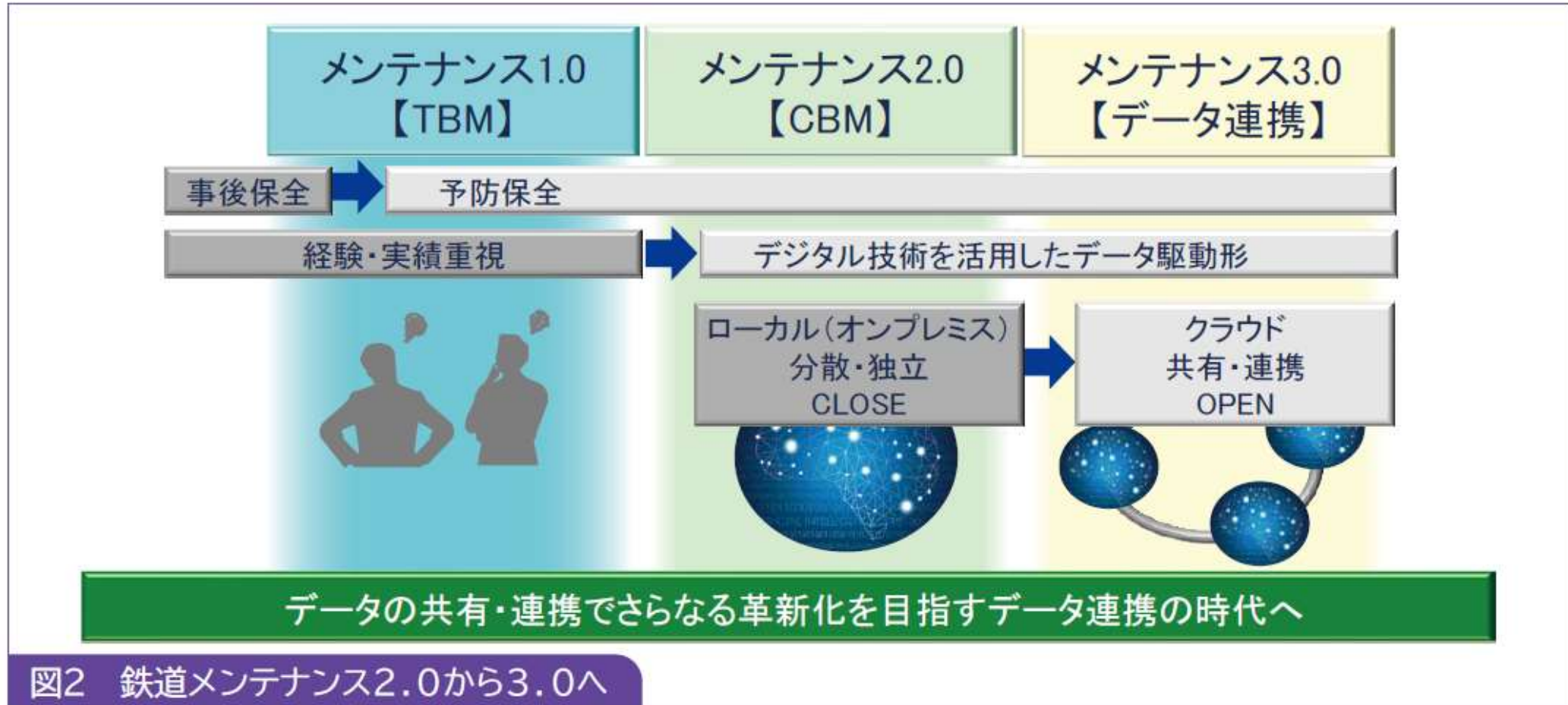
実装時



- 映像撮影区間：東急電鉄 東横線，横浜高速鉄道 みなとみらい線，名古屋市交通局 東山線，JR九州 鹿児島本線，西日本鉄道 天神大牟田線，伊豆急行線 で実証実験



おわりに



(出典) RRR 2023.1-2 「持続可能な鉄道を支えるメンテナンス技術 —検査・診断の革新—」
<https://www.rtri.or.jp/publish/rrr/2023/rrr01.html>