

4. インフラスマートマネジメント手法の検討

4.1 マイルストーン及びアウトカム指標の設定

3。で検討した原案及び計画素案に対する意見を踏まえ、インフラスマートマネジメントの柱となる、ICTスキルや耐久性向上スキルの現場実装に向けた試行活用を行い、実用レベルにステップアップを図る。具体的には、インフラスマートインフラマネジメントに関するICTスキルや構造物耐久性向上スキルの現場実装に向け、以下についての試行検討を進めた。

- ・インフラスマートマネジメントシステムの試行及び短期的効果のモニタリング
- ・昨年度提案した4Sプランにおける、メインスキルの試行と検証
- ・耐久性向上スキルとなるウルトラファインバブル水（UFB水）による構造物洗浄の確立

インフラスマートマネジメント技術ごとのアウトプットとアウトカム指標（案）設定について、表-4.1に示す。

表-4.1 インフラスマートマネジメント技術ごとのアウトプットとアウトカム指標（案）の設定

試行新技術	期待する効果	アウトプット	アウトカム指標
インフラスマート マネジメントシステム	<ul style="list-style-type: none"> ・変状の早期発見 ・種々道路施設の簡易総合評価 ・点検困難施設の診断・評価 	巡回・日常点検のスマート化	<ul style="list-style-type: none"> ・データ蓄積に基づく重点点検箇所の抽出 ・AIによる点検結果の工学的な関係性, 要因分析 ・専用車両開発など
	<ul style="list-style-type: none"> ・変状の健全度判定 ・変状進展予測 	定期点検のデジタル化(3Dデジタル野帳システムとFEMモデルの統合)	<ul style="list-style-type: none"> ・定期点検の精度向上 ・大地震発災時等の健全度診断(職員等) ・デジタルツインによる維持管理の効率化
4Sプラン <ul style="list-style-type: none"> ・Sharp(メリハリのある) ・Smart(スマートな) ・Secure(しっかりとした) ・Sustainability(持続可能) 	<ul style="list-style-type: none"> ・点検困難重要構造物の変状の早期発見と健全度診断 ・大地震発災時の点検支援 	羽田スカイアーチ変状センシングシステム	<ul style="list-style-type: none"> ・種々な点検困難施設の工学的な健全度診断 ・長期のヘルスマonitoring
	<ul style="list-style-type: none"> ・突発的な異常事態の遠隔検知 	街路灯等に添架する遠隔モニタリングシステム(スマートバルブ)	<ul style="list-style-type: none"> ・複数の構造物を対象とした遠隔監視 ・自然災害発災時の安全性、使用性判断
データベース・マネジメントシステム	複数施設の統合管理	インフラ健全度モニタリング	統合システム(プラットフォーム構築)による現況性能の確認と耐久性の定量的判断
構造物UFB水洗浄	鋼構造物の耐久性向上	構造物UFB水洗浄マニュアル	<ul style="list-style-type: none"> ・メンテナンス費用の縮減 ・洗浄対象施設の拡大

4.2 インフラスマートマネジメントシステム

4.2.1 インフラスマートマネジメントシステムの概要

インフラスマートマネジメントシステムは、現時点で使える最新のツール（先端センシング技術、AIによる変状検知、DXなど）や最新の知見（高精度な劣化進行予測及び耐荷力推定など）を導入することによって、インフラメンテナンスのスマート化（効率化、高度化）を図ることを目的とする。内容は、5年に1度の頻度で、近接目視を主体として実施している定期点検と、従来は施設の機能の確認的な役割を果たしてきた日常巡回点検に、各種のモニタリング（作用と応答）を組み合わせデジタルトランスフォーメーション（以下、DX）でシームレスに連携し、変状の早期発見と効率的・効果的な措置の実施を高速かつ最適に実現するものである。

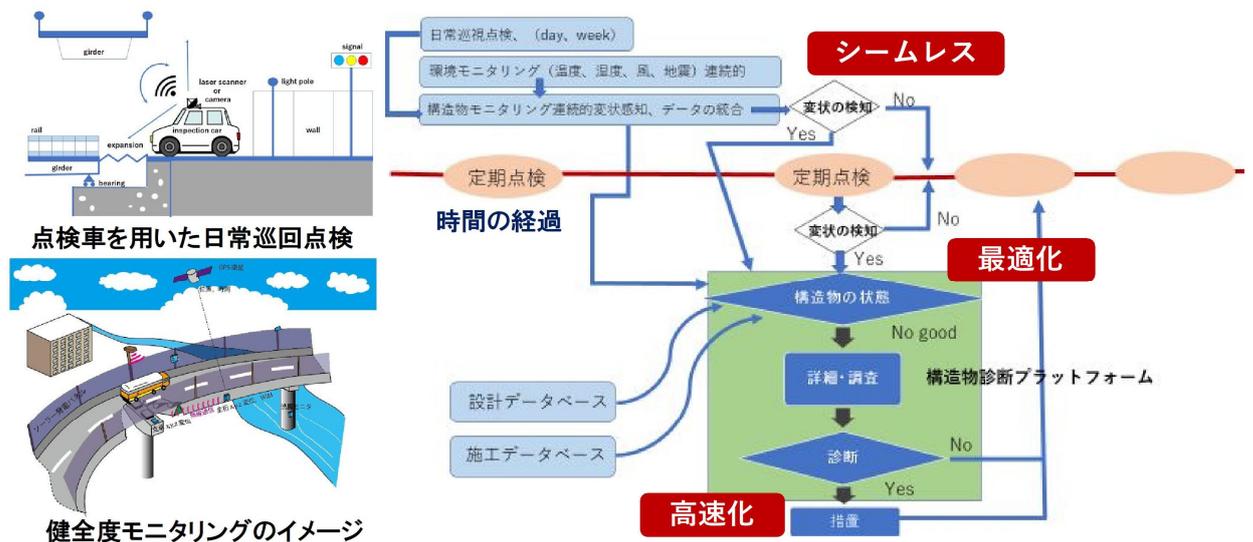


図-4.1 インフラスマートマネジメントシステム

令和3年度に示した図-4.1を基に、提案した各システムをより具体的に令和4年度のインフラスマートマネジメントシステムの技術体系を図-4.2に示す。

令和4年度に示すインフラスマートマネジメントシステムの技術体系としては、「定期点検のデジタル化」、「日常巡回点検のスマート化」、「耐荷診断・劣化予測技術」、「インフラの健全度モニタリング」の4つで構成され、それぞれ技術は、現実空間（変状データ取得）及び仮想空間（診断、劣化予測）でデジタルツインを形成し、構造物の診断に特化したプラットフォームの実装を目指すものである。

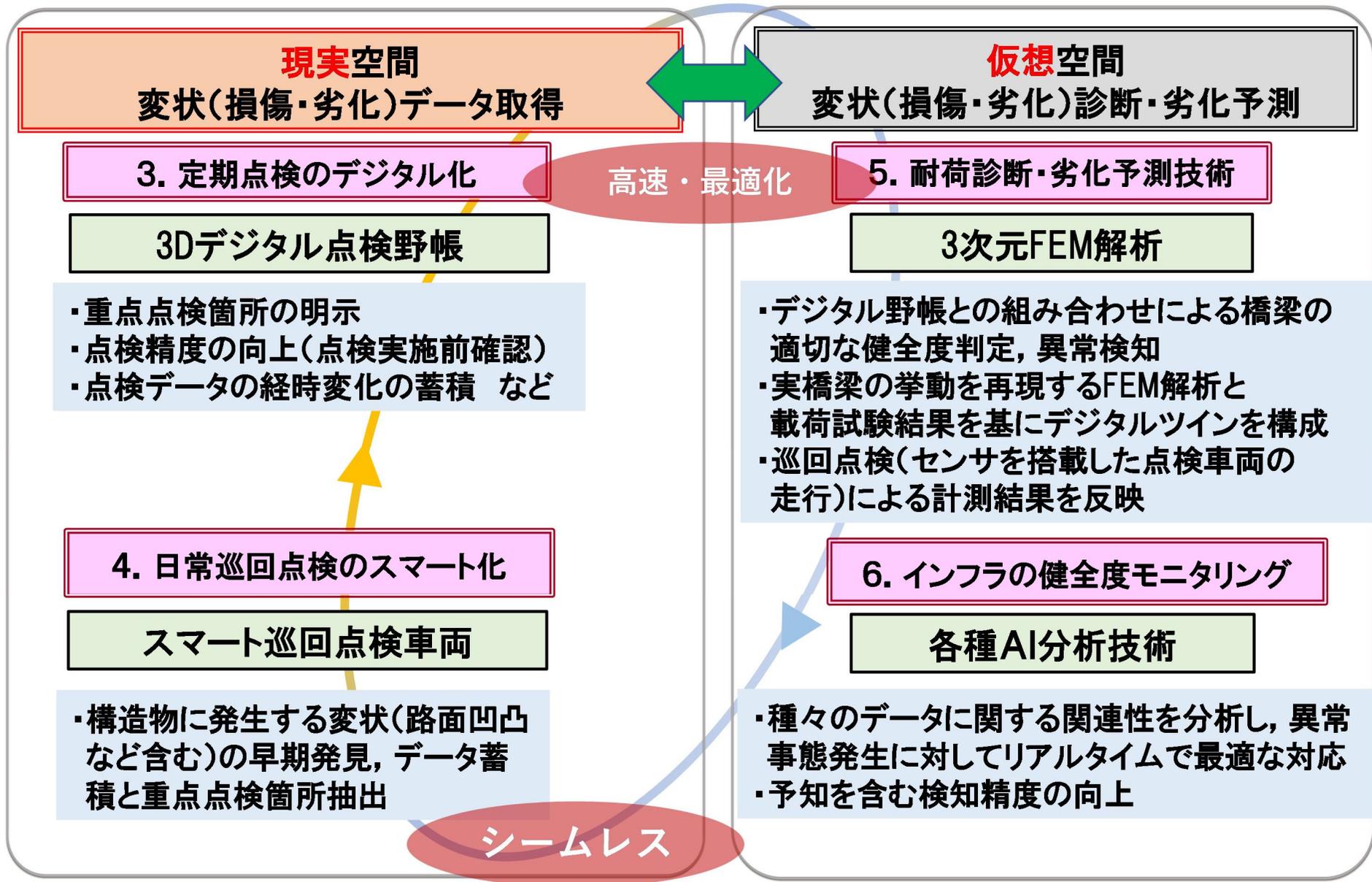


図-4.2 インフラスマートマネジメントの技術体系

4.2.2 定期点検のデジタル化技術

定期点検のデジタル化を進めるにあたって、デジタルツインを構成する現実空間における構造物に発生する変状を適切に確認することが重要である。点検員が現地で変状を確認し、変状の位置、規模、特徴などをクラウド上のデータベース・マネジメントシステムに保存するツールが3Dデジタル野帳である。

(1) 3D デジタル野帳システムの開発

令和4年度は、定期点検のデジタル化の具体的な手法として3Dデジタル野帳システムを提案、環八跨道橋を対象に構築し、現場実証を行った。

3Dデジタル野帳システムは、3Dバーチャルリアリティ(virtual reality:VR)技術を駆使して、橋梁をVRとして構築し、点検箇所の指示、点検結果のInput、点検結果の集計などを可能とする。

3Dデジタル野帳は、図-4.3に示すようにディスプレイ上で事前に点検個所の確認や点検実施時の点検技術者の目線を確認することができる。点検を行う前に仮想空間上で、点検作業の再現、課題抽出や点検計画の検討が可能であるため、既設橋梁への適用を図ることによって点検の信頼性確保(変状の見逃し防止、変状箇所の誤報告、点検員教育)及び点検の効率化(内業の効率化、点検報告精度の向上)など、大きな効果が得られる。また、現地点検においては、点検端末を使うことで変状の見落とし、誤診断等を減らすことが可能となる。図-4.4に現地点検における3Dデジタル野帳実装した点検状況を示す。



図-4.3 3D デジタル点検野帳を実装した点検端末



図-4.4 3D デジタル点検野帳を使った点検状況

図-4.5 は、環八跨道橋を対象に構築した3D デジタル野帳における点検対象部材表示の概要を示す。

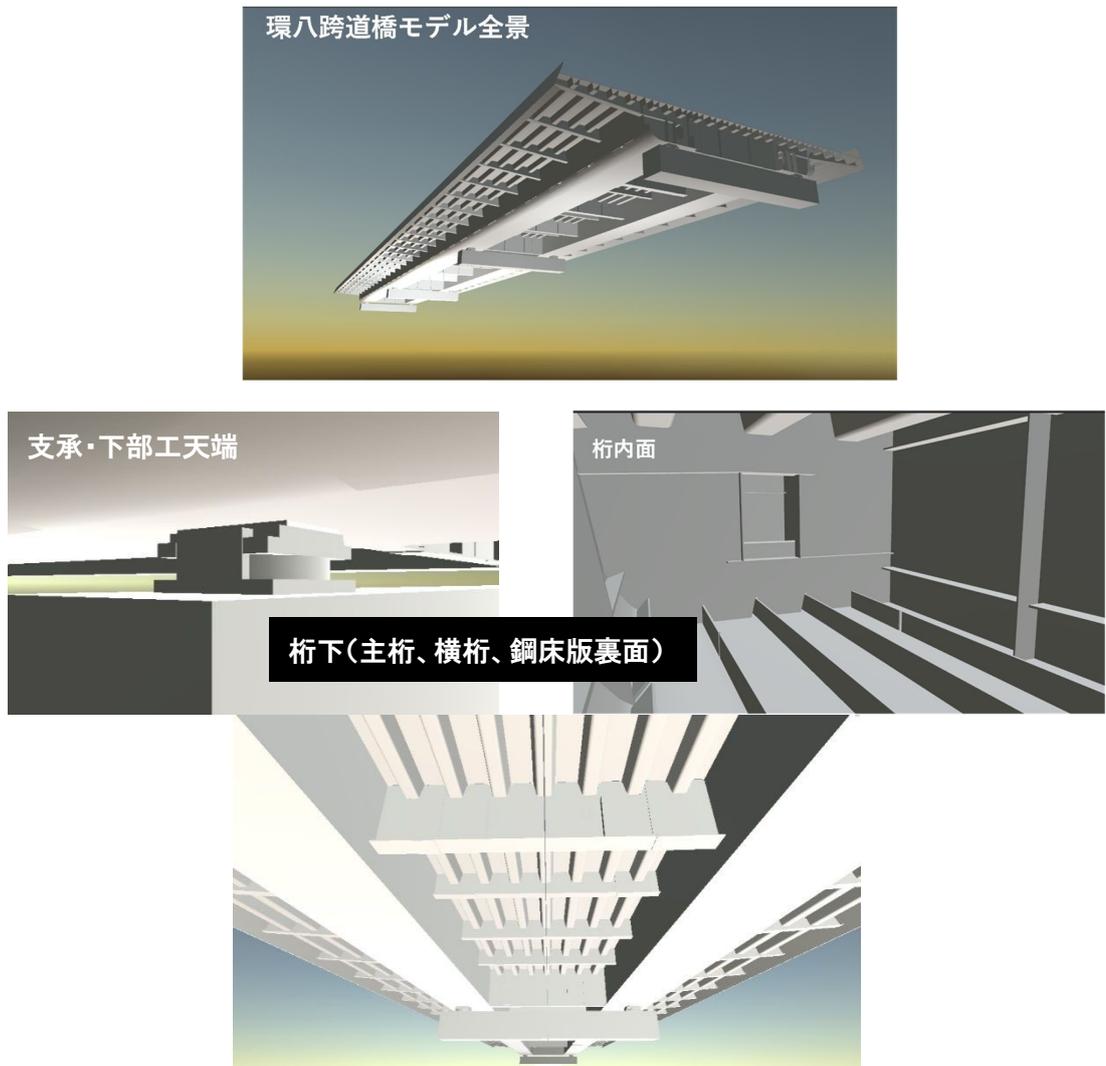


図-4.5 3D デジタル点検野帳におけるモデル概要（環八跨道橋）

(2) 3D デジタル野帳システム実装効果の検証

3D デジタル野帳が実務でどのように機能し、課題としてはどのような事があるのかを検証する目的で実装効果の確認を行った。今回構築した試行版を用いた現場検証は、環八跨道橋の G1 箱桁内 2 径間を対象に、実施経験年数 3 年未満の技術者 2 名ペアと経験年数 10 年超技術者 2 名ペアが、それぞれ、3D 野帳実装前と 3D 野帳実装後に、図-4.6 に示す第 1、3 径間の近接目視点検を行い、予め実施されたプロフェッショナルによる目視点検の結果と対比することにより、実装効果を測った。

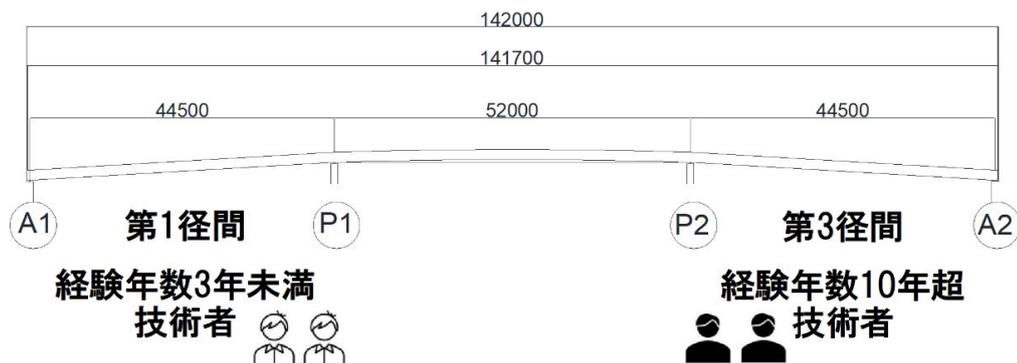


図-4.6 環八跨道橋 3D デジタル点検野帳の現場検証

今回行った 3D デジタル野帳を使って現場検証を行った結果を図-4.7 に示す。

第1径間:10年超技術者実装前, 3年未満技術者実装後
第3径間:3年未満技術者実装前, 10年超技術者実装後

■ 実装前 ■ 実装後

第1径間				第3径間			
プロフェッショナル	塗膜割れ	16		プロフェッショナル	塗膜割れ	2	
	塗膜劣化	3			塗膜劣化	16	
	錆	3			錆	2	
	計	22			計	20	
10年超技術者実装前	塗膜割れ	6	38%	10年超技術者実装後	塗膜割れ	0	0%
	塗膜劣化	2	67%		塗膜劣化	8	50%
	錆	0	0%		錆	0	0%
	計	8	36%		計	8	40%
3年未満技術者実装後	塗膜割れ	8	50%	3年未満技術者実装前	塗膜割れ	0	0%
	塗膜劣化	0	0%		塗膜劣化	14	88%
	錆	0	0%		錆	0	0%
	計	8	36%		計	14	70%

- 塗膜割れ(亀裂)発見には効果があった 10年超技術者実装前<3年未満技術者実装後
- 塗膜劣化や錆は発見しやすいが, 報告有無は個人差がある。特に3年未満技術者は細かく拾っている。

図-4.7 環八跨道橋 3D デジタル点検野帳の現場検証結果

令和4年度に構築した3Dデジタル野帳の現場検証を行った結果、第1径間は、未実装の10年超の熟練点検員と実装した3年未満の経験の浅い点検員の差異が、塗膜割れについて38%に対し50%と12%検出率が向上している。このことから、疲労亀裂発生の前兆である微細な塗膜割れについては、デジタル野帳の効果がある結果となっている。しかし、第3径間は、プロフェッショナル点検員が確認している塗膜割れに対し、実装している10年超の熟練点検員でも見落とししており、実装効果が確認できなかった。さらに、塗膜劣化については、実装している10年超の熟練点検員が検出率50%に対し、未実装の3年未満の経験の浅い点検員が88%検出と未実装の方が優位となっている。今回の現場検証は、環八跨道橋の箱桁内で変状の発生率が低い現場での検証であることを差し引いても、3Dデジタル野帳の実装効果が明確に示せる結果とはならなかった。今回得た現場検証結果を3Dデジタル野帳点検ツール構築のフィードバックし、より明確な差異が得られるようにシステム自体の改良が必要と判断される。

(3) 3D デジタル野帳システムの試行結果のまとめ

3次元デジタル野帳の効果について、3D デジタル野帳を試行した点検員の意見と現場検証結果を考慮したまとめを、以下に示す。

[事前教育について]

- ・ 構造詳細、構造的な特徴を把握するには図面よりも3Dモデルの方が理解しやすい。
- ・ 構造的な特徴や変状の発生しやすい箇所など留意点の明示は点検に有用である。

[点検時について]

- ・ タブレットは点検時に負担とならない。
- ・ 3D デジタル野帳を用いた点検は、現場でのインプット作業があり、若干効率が下がる。
- ・ 事前教育を行うことにより、変状の見落とし、見逃しは減る。

[効果について]

- ・ ICT 及び DX 社会に馴染んでいる若手技術者は、点検端末や3D デジタル野帳についてゲーム感覚で点検を行えることから実装について非常に好ましいとの判断である。
- ・ 3D デジタル野帳の目指す方向性について図-4.8 に示す。

[今後の方向性について]

- ・ 変状箇所、写真等が展開図等に出力できれば内業の効率化となる⇒自動出力 prg 検討
- ・ 3Dモデルは見た目が分かりやすいので他者でも理解できる。
従来は点検者が写真整理をするが、他者に内業を任せることが可能⇒内業効率化
- ・ 変状箇所を 3D モデルに直接入力するので、変状箇所の誤記入、転記ミスがなくなる
⇒点検信頼性確保



図-4.8 3D デジタル点検野帳の効果のまとめ

4.2.3 日常巡回点検のスマート化技術

道路施設（道路橋、トンネル、路面、擁壁、路面空洞・異常、道路標識、街路灯、街路樹、付属物など）の日常点検のスマート化は、日常点検のプロセスをデジタル技術によって自動化し、より迅速で確実な点検を行うことである。スマート化によって、点検が効率的・効果的に行え、道路施設の安全性、使用性及び耐久性を維持、向上させることが可能となる。日常点検のスマート化を行うには、センサー技術やビッグデータ分析技術を活用することであり、センサー技術によって、橋梁等の振動や変形をリアルタイムで監視が可能となる。また、画像認識技術とAIを組み合わせることで、道路施設の変状や欠陥を自動的に検出することが可能となる。さらに、点検で得られたビッグデータの分析技術を活用することで、膨大なデータから異常や異常に繋がる微細な動きを検知し、定期点検時の注視箇所、詳細点検や措置の必要性を適切に判断が可能となる。日常点検をスマート化することで、点検時の負担を減らし、より効率的・効果的な日常点検を行うことが可能となる。また、日常点検時に取得したデータの蓄積や分析を行うことで、将来の点検やメンテナンス計画がより実行性の高いものにするのが可能となる。

(1) インフラスmartマネジメント巡回点検車両及び関連システムの開発

インフラスmartマネジメント巡回点検車両はデジタル技術を活用した未来型特殊車両である。インフラスmartマネジメント巡回点検車両には、センサー技術やデジタルカメラ、赤外線カメラ、マイク、加速度計、路面下レーダなどの機器が搭載され、道路施設を走行しながらリアルタイムに点検や監視を行うことが可能で、GPSや加速度センサー、ジャイロセンサーなどの搭載によって、車両の位置、振動、傾きなどを計測することが可能となる。複数のセンサーの活用は、第一に高度なデータ収集を複数のセンサーを使用することで各施設に関する多角的なデータ収集が可能となる。これによって施設の現状を正確に把握が可能となり、効果的・効率的なメンテナンス計画策定が可能となる。第二には、複数のセンサーによる継続的なモニタリングを行うことで、対象施設に異常が検知された場合には、早期に対処が可能となり、安全性、使用性の確保が可能となる。第三には、コスト削減があげられる。複数のセンサーが同時期に機能することから、点検・診断に要する時間やコストを削減することが可能となる。また、変状の早期発見によって、措置費用の削減が可能となる。第四には、取得したデータを統合して可視化が可能となり、技術レベルに関係なく分かり易く表示が可能となる。これによって、施設の状態をリアルタイムで把握するだけでなく、変状・異常個所を短期に特定が可能となる。第五には、複数のセンサーによる継続的な監視を行うことで、喫緊の課題である予防保全管理が実行でき、施設の延命化が可能となる。

道路施設の点検や監視を行うために開発する今回のシステムは、構造物に発生する変状（路面凹凸など含む）の早期発見、データ蓄積と重点点検箇所を抽出すること目的とし、

点検車による目視点検の標準化及び自動化を目標としている。以下に技術の概要を示す。

① プロフェッショナル点検員の暗黙知を AI で学習

- ・車両に搭載している複数のセンサーデータをもとに橋梁・道路の路面及び路面下の状態や構造物の変状を捉え、プロフェッショナル点検員が持つスキルや暗黙知を反映した診断を可能とし、診断データを累積して学習機能も持つシステムである。

② プロフェッショナル点検員の視点、診断基準による点検の自動化・標準化

- ・点検員の経験や技術レベル等によって診断基準が曖昧になりがちな判定について今回提案し、組み込む AI を使った診断を標準とすることで変状などの状況を適切に共有することが可能となる。

③ データ蓄積による経年変化の可視化と劣化の予測

- ・日々行う日常点検で取得したデータを蓄積し、注視すべき変状の時系列変化についての確認し、進展度が早い変状や変化が激しい箇所を抽出し、それらを可視化することで簡易に適切に管理することが可能となる。
- ・日常点検においてインフラスマートマネジメント巡回点検車両の走行によって取得したデータをデジタルツインとして構築した「3D デジタル野帳システム」や FEM 解析モデルと共有することによって、現在行っている定期点検への情報提供や劣化の進展予測を行うことなど今回構築する種々な仕組みの統合管理を行う。統合管理には、4S プランの変状センシング・モニタリングによって取得したデータとの連携やシステム連携も行い、羽田空港管内の全ての道路施設を対象とする最先端のインフラスマートマネジメントの仕組み構築を目指す。

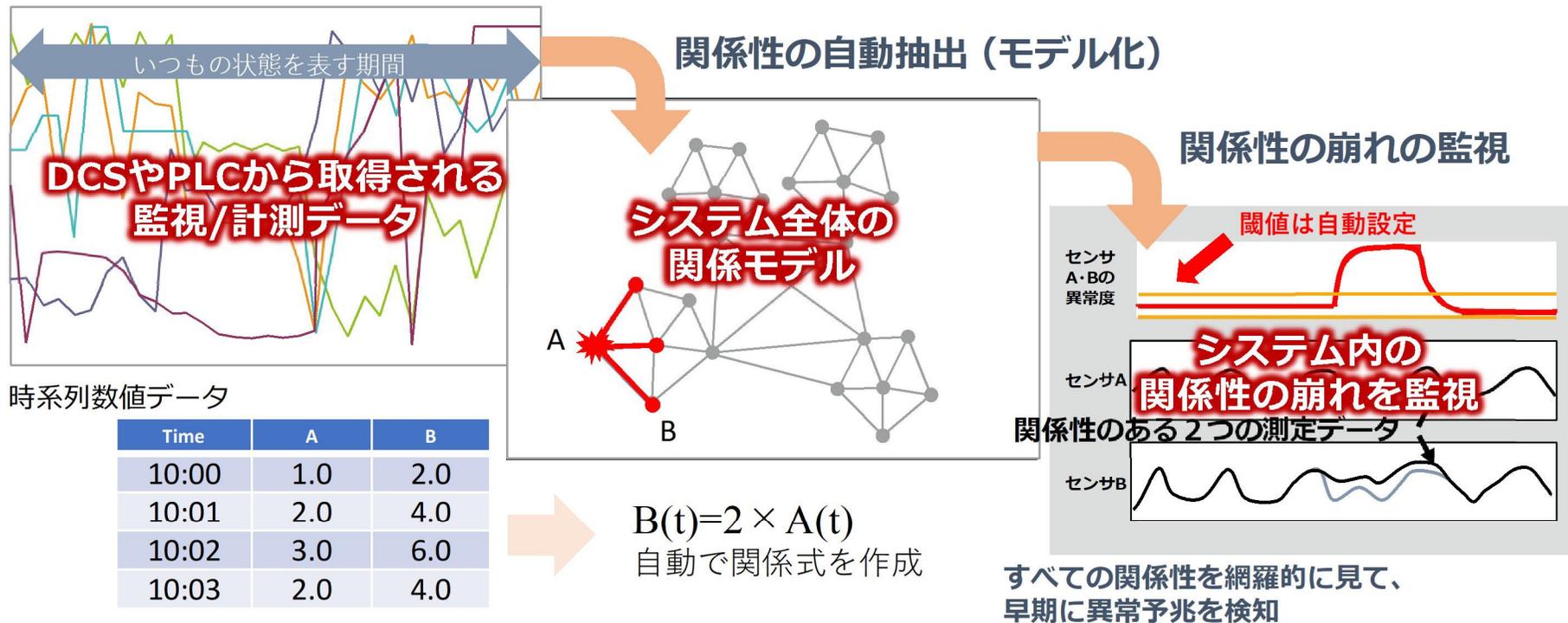
④ 特殊点検車両による点検の高精度化（標準化及び自動化も達成）

- ・従来の個々のセンサーの絶対値の変化に加えて、今回搭載している複数の異なるセンサーデータを統合的に分析することで変状を的確に把握することが可能となる。
- ・熟練点検員による判断結果とセンサーによって取得したデータの状態について AI を使って学習させることで、施設に発生している変状を熟練点検員や高度専門技術者の視点で適切に判断することが可能となる。
- ・点検対象施設に関する専門的な知識や技術的な知見であるドメイン知識とデータ解析技術を組み合わせて活用することで、より効率的・効果的な予防保全管理が可能となる。

⑤ 最先端の分析技術

- ・インフラスマートマネジメントにおける AI を使った分析技術として、画像認識技術、自然言語処理技術、データマイニング技術、深層学習技術、強化学習技術、予測分析技術などが想定され、これらを現状に適合するように組み合わせることで施設の状態や問題点をリアルタイムで把握し、可視化し、最適な戦略的メンテナンスが可能となる。中でも、予測分析技術は、施設の将来予測や必要費用の予測を可能とする AI を使った技術であり、定期的に点検しているデータを収集し、過去のデータと比較することで変状の進展度予測や変状の程度の予測が可能となる。
- ・過去のデータの中から該当箇所・変状に似た状態を検索し、現時点の状態の識別や同一箇所の変状データの時系列変化の可視化や荷重などの積算値から劣化の進行や危険度を予測する AI による分析技術の組み込みが考えられる。ここに示す分析技術としては、例えば、既存の AI 分析技術であるインバリエント分析とモデルフリー分析を組み合わせ活用することが考えられる。両分析技術の活用方法とは、取得した日常点検等のデータから状態変化を検出する手法のインバリエント分析によって施設の状態変化を検出し、その変化がどのような欠陥や不均一性を引き起こしたかについてモデルフリー分析で詳細に調査し、予防保全計画に機能させることが考えられる。
- ・先に示すインバリエント分析やモデルフリー分析は、既存の分析技術であることから有効に活用することもインフラスマートマネジメントには必要と考えるが、上記以外の手法、例えば、異常検知、予測分析、クラスタリング分析及び最適化分析における新たな分析技術を開発し、既存の分析技術と組み合わせより高度で、最適化が確実に可能となるシステムを構築することが望ましい。令和 4 年度に試行したインバリエント分析について図-4.9 に示す。今回インフラスマートマネジメント点検車両に搭載した各種センサーから得られたデータを故障に備えた待機システムとして分散制御システム (DCS: Distributed Control System) 及び設備の制御に使われているプログラマブルロジックコントローラ (Programmable Logic Controller) データとして取得し、インバリエント分析のデータ相互間の関係性 (関係性が強いものなど) を抽出して一対一にモデル化して関係式を作り出し、その際、モデル化したセンサー間の関係式コンピューターによる高速演算が可能な単純式化されることによってリアルタイムで比較することが可能となっている。図の右側、最終段階では、データ比較から人間では感知できない微小な変化や過去に発生したことが無い未知の変状や異常を早期に発見が可能となる仕組みである。この仕組みを活用することで、変状発生個所の特定が可能となり、事故発生を未然に防ぎ、今回目指している予防保全型管理を効率的に構築することが可能となる。ここに示すインバリエント分析及びモデルフリー分析技術は、NEC 社の最先端 AI 技術群 (NEC the WISE) の一つであり、有益な AI 技術ではあるが NEC 占有技術である

可能性が高く、今回の羽田空港管内の土木施設を対象とした先端的インフラスマートマネジメントを進めるためには、より一般的な AI 分析技術の採用や新たな AI 技術開発が望ましいと考える。



1. それぞれの関係性は、その関係するコンポーネントの局所特性を捉えることができる。
2. 大量の関係性を見出すことで、システム全体の特性を従来とは異なる視点から捉えることができる。
3. それぞれの関係性の変化を監視することでシステムの運用状態を理解することが可能。

図-4.9 インバリエント分析技術と活用方法

インフラスマートマネジメント日常巡回点検における自動化の対象となる現時点の点検項目、変状について、「東京国際空港維持管理・更新計画書」より抜粋した結果を表-4.1に示す。試行においては、まず、着色部で示された目視による点検での負担が大きい橋梁・道路の路面・路面下の変状に注目して分析を実施した。

表-4.1 自動化の対象となる巡回点検の点検項目、変状

施設区分	点検項目	施設の種類	点検項目	変状の種類
構内道路	舗装の状況 標識の状況	バスプール タクシープール	舗装の状況	線状ひび割れ、亀甲状ひび割れ、わだち揺れ、段差、ポットホール
			標識の状況	路面標示の不鮮明
高架の添架物 道路標識 (門型式・片持式・添架式)	構造物の状況 取付の状況 (旅客ターミナル地区)	電光掲示板 バスルーフ	構造物の状況	破損、変形、腐食、標示板の不鮮明
			取付の状況	揺れ
道路橋・歩道橋	構造物の状況	コンクリート橋 鋼橋	構造物の状況	地覆・高欄(コンクリート):剥離、鉄筋露出、うき地覆(鋼製):破損、変形 高欄(鋼製):破損、変形 桁下・化粧パネル(遠望目視含む):破損、変形 床版上部/内部およびコンクリート・鉄筋の劣化

インフラスマートマネジメントを進める有効なツールとなる日常点検用試作車両に搭載する各種センサー設置状況を図-4.10～図-4.12に示す。

ルーフキャリアに設置した機器

□GNSSレシーバ

- RTK-GNSSによる高精度測位
- 測位精度：1～5cm

□赤外線サーモグラフィカメラ

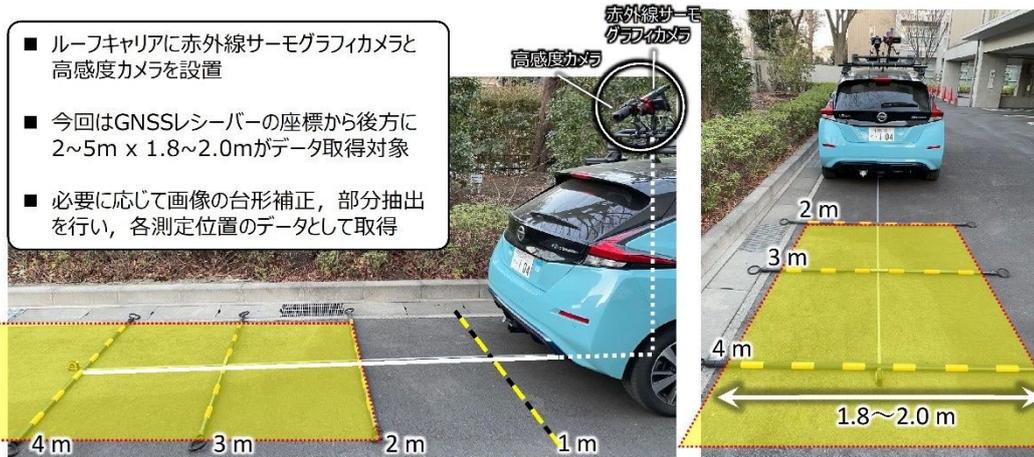
- 120Hz/640x120
- 測定温度範囲：-40～2000℃
- 温度分解能：0.025℃ @30℃

□高感度カメラ

- 3300万画素，裏面照射型CMOS

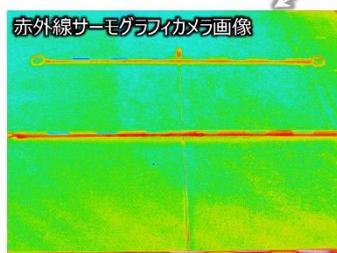


図-4.10 車両におけるセンサー設置状況①



設置治具およびレンズの調整により画角を調整

- データ分析における前処理を軽減
- 分析精度およびデータ収集効率のデータから, 今後さらに調整が必要



各センサセットアップ状況

口後部車軸上の荷室に加速度センサー, およびマイクを設置

口加速度センサーは結束バンドで固定

口マイクは薄手の両面テープで固定



図-4.11 車両におけるセンサー設置状況②



図-4.12 車両におけるセンサー設置状況③

インフラスマートマネジメント点検試作車両に搭載するセンサー機器類のまとめを表-4.2に示す。

表-4.2 車両に搭載したセンサー一覧表

計測機器名	機器詳細	データ種類	設置位置	個数	計測対象	検知対象	備考
スマートフォンカメラ	1,200万画素 1/2.55型	動画	車内	1	路面 標識・防音壁など	路面の状態・異常 標識, 防音壁の劣化・変状	
赤外線サーモグラフィカメラ	120Hz/640x120	動画/時間ごとメッシュデータ	ルーフキャリア	1	道路表面	路面/路面下の状態・異常	アビオニクス: InfReC R550s
高感度カメラ	3300万画素, 裏面照射型 CMOS	動画	ルーフキャリア	1	道路表面	路面の状態・異常	Sony: a7S IV
地中レーダー	マイクロ波地中レーダ	位置ごと数値メッシュデータ	専用車両(車両後部)	1	道路下構造	路面下の状態・異常	ジオ・サーチ探査車両で計測
加速度センサー	3軸加速度センサー	3軸加速度時系列	車内	4	路面凹凸	路面の状態・異常	エプソン: M-A352AD10
マイク	10Hz~60kHz	音声(時系列)	車内	1	路面・タイヤ間の摩擦音	路面の状態・異常	NEC: 音響解析ゲートウェイ
GNSSロガー	高精度測位	緯度・経度(時系列)	ルーフキャリア	1	計測位置	計測位置	ジオ・サーチ探査車両にも設置
ノートパソコン	GPU搭載 2TBストレージ		車内	1	データロガー	-	マウスコンピューター: DAIV 6N

日常巡回点検のスマート化を進めるために、巡回車両に変状を検知する計測機器、システム等を搭載し、得られたデータから路面、構造物に発生している変状、進展している変状をその位置及び健全性、進展性、危険度等をリアルタイムで簡易に、そして確実に診断し、診断した結果を指定された区分に評価、画面表示し、データ保存を行う。

(2) インフラスマートマネジメント巡回点検車両の試験走行、データ計測、解析

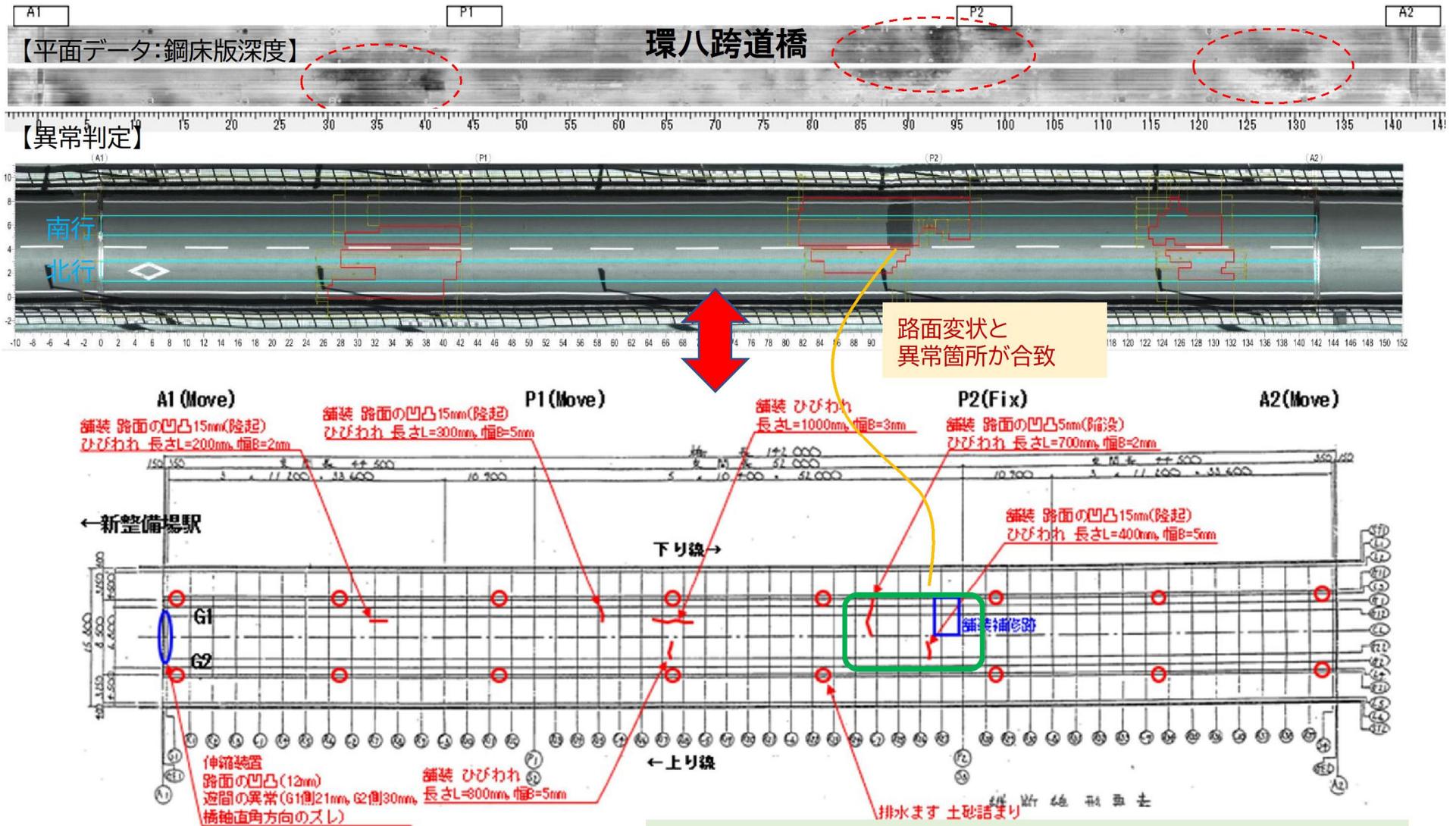
インフラスマートマネジメントを確実に進めるために、道路施設の現状を調査し、変状程度、健全度等を多角的に捉えたデータを取得し、インフラスマートマネジメントに有効に機能することを可能とする種々なセンサー類を搭載した試作点検用車両（市販一般車両）を東京国際空港管内道路（試験走行指定路線）において試験走行し、実用化に向けた必要なデータ取得、検証を行う。路面下レーダ探査車両により取得されるデータも合わせた統合的なデータ分析によって、診断精度の向上と異常要因等の分析の実証を行う。さらにこれらの分析結果を3Dデジタル野帳システムと統合し現場で連携できるシステムの構築につなげる。なお、スタート・ゴール地点付近で路面下空洞及び緩みレーダ探査検証を行う。なお、今回路面下レーダ探査は、目視が困難な路面下の異常、空洞、緩み等の検出が目的であることから、事前に路面下の状態を把握した地点及び路面下に管路等の埋設工事を行いそれらの位置は明確な路線や道路橋を対象に試験走行を行っている。

- ① 試験走行期間：令和5年2月中旬～末
- ② 試験走行路線：東京航空局指定路線
- ③ 収集データ回収、検証期間：令和5年2月中旬～3月上旬

図-4.13～図-4.15に地中レーダによる変状検出結果を示す。

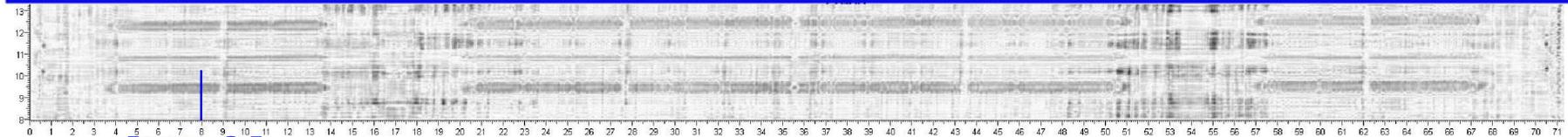
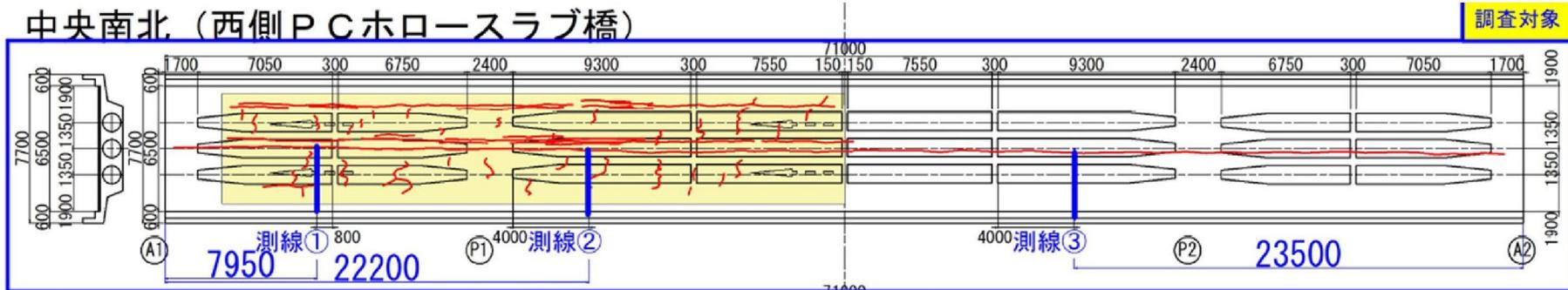
- 環八跨道橋で実施した路面下レーダ探査による異常表示箇所と事前に詳細調査を行い確認した橋面変状発生箇所は一致する結果となった。
- 西側PCホロースラブで実施した路面下レーダ探査で探査した床版上面からボイド管までの距離と昨年度既存舗装を剥いで詳細な手動レーダ探査を行った深さ方向の距離は、概ね一致する結果となった。
- 既存道路において、路面下埋設物の深さ方向の距離と位置が明らかとなっている箇所の路面下レーダ探査結果は、埋設されている管路等を概ね正しく探査ができている結果となった。今回試験走行、調査した路面下レーダ探査は、誤差の無い探査を目的とするものではなく、路面下の異常を対象にスクリーニングすることが目的であることから、今回試験走行した路面下レーダ探査機器は要求性能を満たしていると判断される。なお、現行の路面下レーダ探査機器は大型で重量も大きいことから、今後、東京航空局の所有する日常巡回点検車両に搭載することを想定すると、現状の約1/2程度まで小型化が必要である。
- 今回の路面下レーダ探査車両の走行結果から、西側上層道路橋（ダブルデッキ）において、RC床版上面の劣化が進行している可能性があることが検知された。異常が検知された当該箇所は、過去に、伸縮装置付近で舗装の異常があり、雨水の浸透など

によって RC 床版の上面の劣化が進行していると予想される。このことから、西側上層道路橋（ダブルデッキ）のような、床版下面からの点検が困難な状況下での異常の検知に、路面下レーダ探査技術が十分寄与する可能性が高いことが明らかとなった。

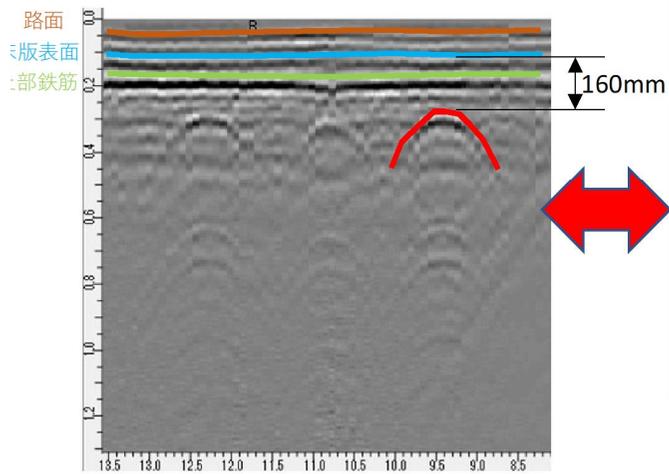


橋面点検調査(レーダ探査に合わせて実施) **レーダー異常表示箇所と橋面変状発生箇所は一致**

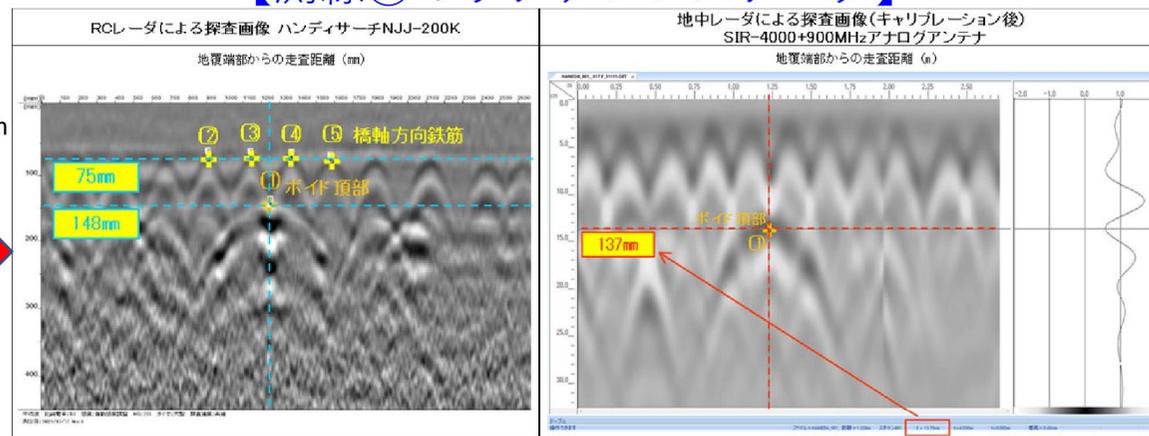
図-4.13 環八跨道橋の橋面変状箇所の検出結果



【測線①】
【測線①のレーダ探査】



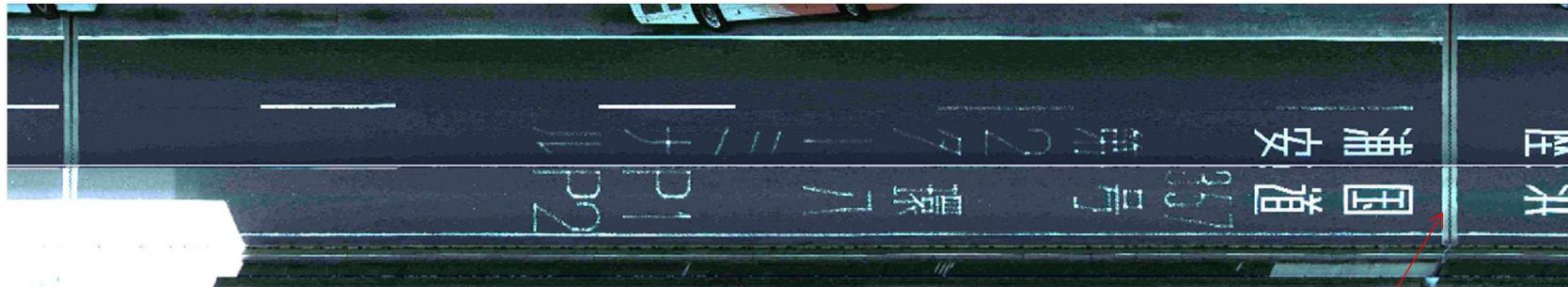
【測線①のリファレンスデータ】



R3に実施した舗装撤去時、現位置でのレーダ探査結果

床版上面からボイド管までの距離は概ね一致

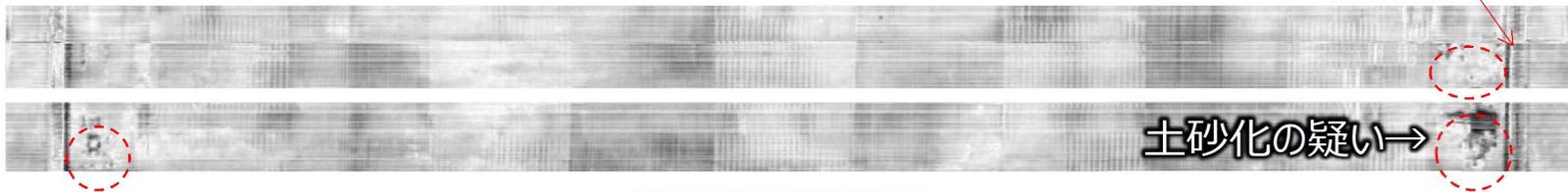
図-4.14 西側PCホロースラブ 床版上面ボイド管の検出結果



【平面データ：床版上面～上部鉄筋深度】

西側上層道路（ダブルデッキ）

N14



過去(H26)の埋設ジョイント劣化(N14)



伸縮装置ひびわれ

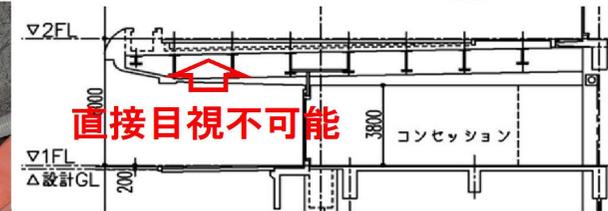


化粧板内部漏水



RC床版下面

耐火被覆によりRC床版下面は点検困難



過去に、伸縮装置付近で舗装の異常があり、雨水の浸透などによってRC床版の上面の劣化が、進行している可能性がある。点検困難状況下での異常の検知に寄与する

図-4.15 西側上層道路橋（ダブルデッキ）床版上面の劣化の検出結果

4.2.4 耐荷診断・劣化予測技術

令和4年度のインフラスマートマネジメントにおいて、重要な事項がデジタルツインである。今回のデジタルツインは、羽田空港管内の道路橋の状態や挙動を仮想空間においてリアルタイムで再現する技術であり、FEMモデルがインフラの安全性や耐久性を評価するなど、メンテナンスの最適化に活用させる考えである。

(1) 3次元 FEM モデル（デジタルツインモデルの構築）

3次元 FEM モデルは、デジタル野帳と組み合わせて、取得された変位データをもとに、仮想空間上で、橋梁の健全度判定、劣化予測を行う技術であり、既設橋梁の挙動を正確に再現可能なモデルを構築することが重要である。本委員会では、3D デジタル野帳を作成する環八跨道橋を対象に図-4.16 に示す 3 次元 FEM モデルを作成することしたが、作成した 3 次元 FEM モデルがどの程度精緻に作成されているかが重要なポイントである。

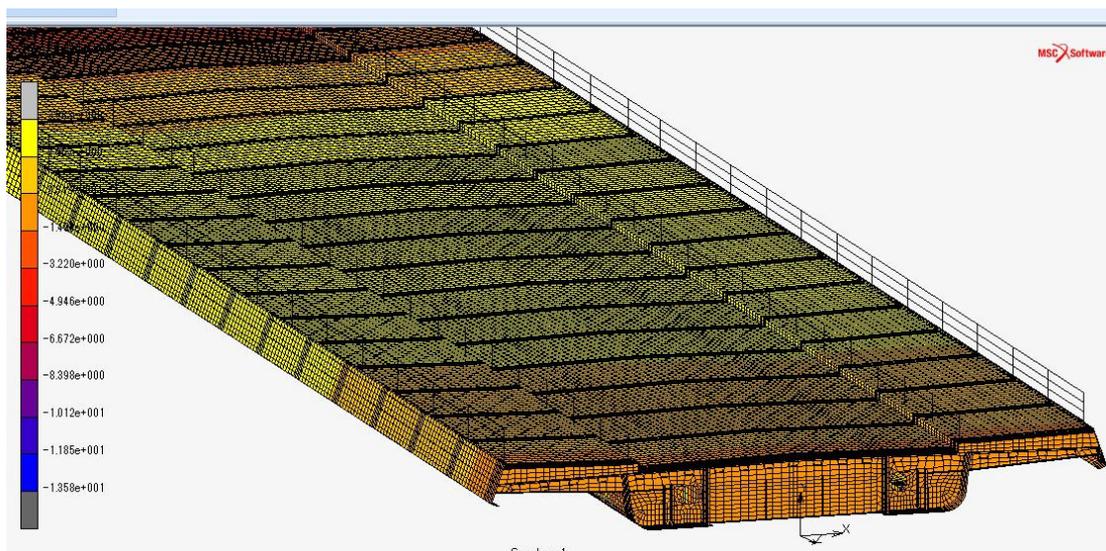


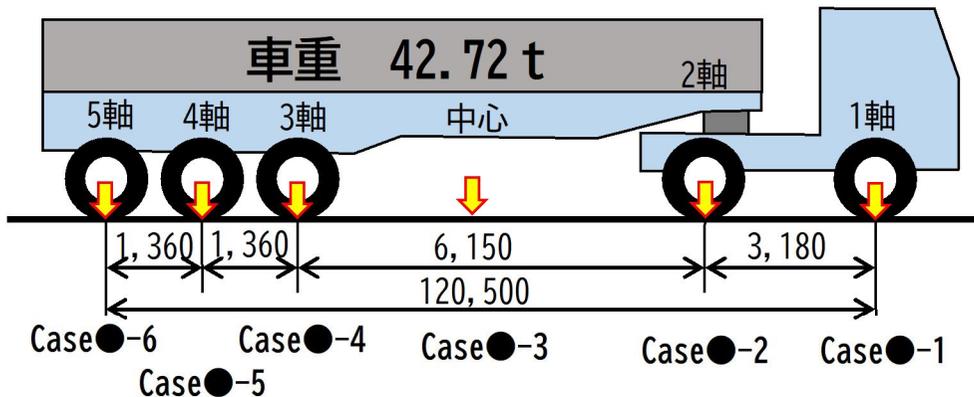
図-4.16 3次元 FEM モデル

作製した三次元 FEM モデルと既設橋との差異を確認するには、既設橋を対象とした載荷試験を行い、実載荷時の各部材応力及び変位や支承変位を計測し、三次元 FEM モデルとの対比を行い、作成した FEM モデルの精緻化を図ることが求められる。環八跨道橋を対象に行った載荷試験の実施概要を図-4.17、載荷試験の結果概要を図-4.18 にそれぞれ示す。載荷試験は、静的、動的載荷試験及び応力頻度計測を行い、載荷試験によって計測された、実測値をもとに、FEM モデルのアップデートを図った。

なお、載荷試験車両は、環八跨道橋が TT-43 で設計された橋梁であることを考慮し、

43 t 車両（特殊車両申請車両）によって載荷試験を行った。

また、静的載荷試験は、図-4.17 に示す位置に荷重車を停止させ載荷試験実施した。載荷ケースは [Case1：第1 径間中央] [Case2：第2 径間 1/4] [Case3：第2 径間中央] [Case4：第2 径間 3/4] [Case5：第3 径間中央] の5 ケースで荷重車の各軸（5 軸）と車両中心の6 軸位置で合計30 ケース実施した。動的載荷試験は、荷重車を20km/h の速度で走行車線の右寄り、中心、左寄りの3 ケースを各3 回走行した。



case	載荷位置
case1	第1径間中央
case2	第2径間 支間1/4
case3	第2径間中央
case4	第2径間 支間3/4
case5	第3径間中央

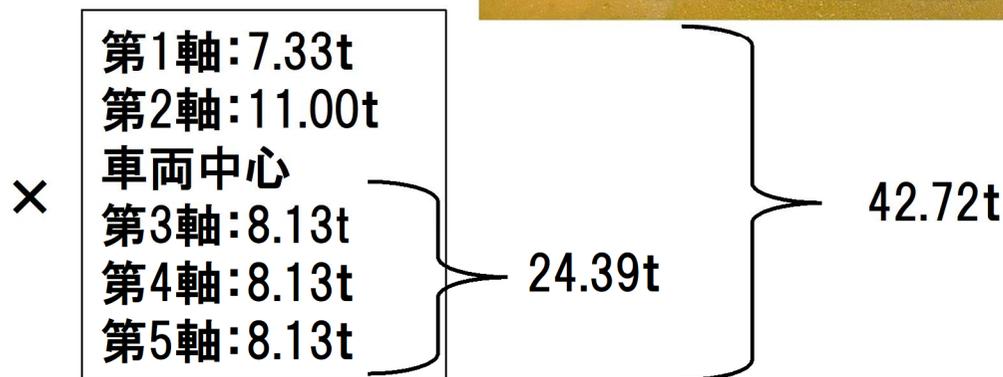
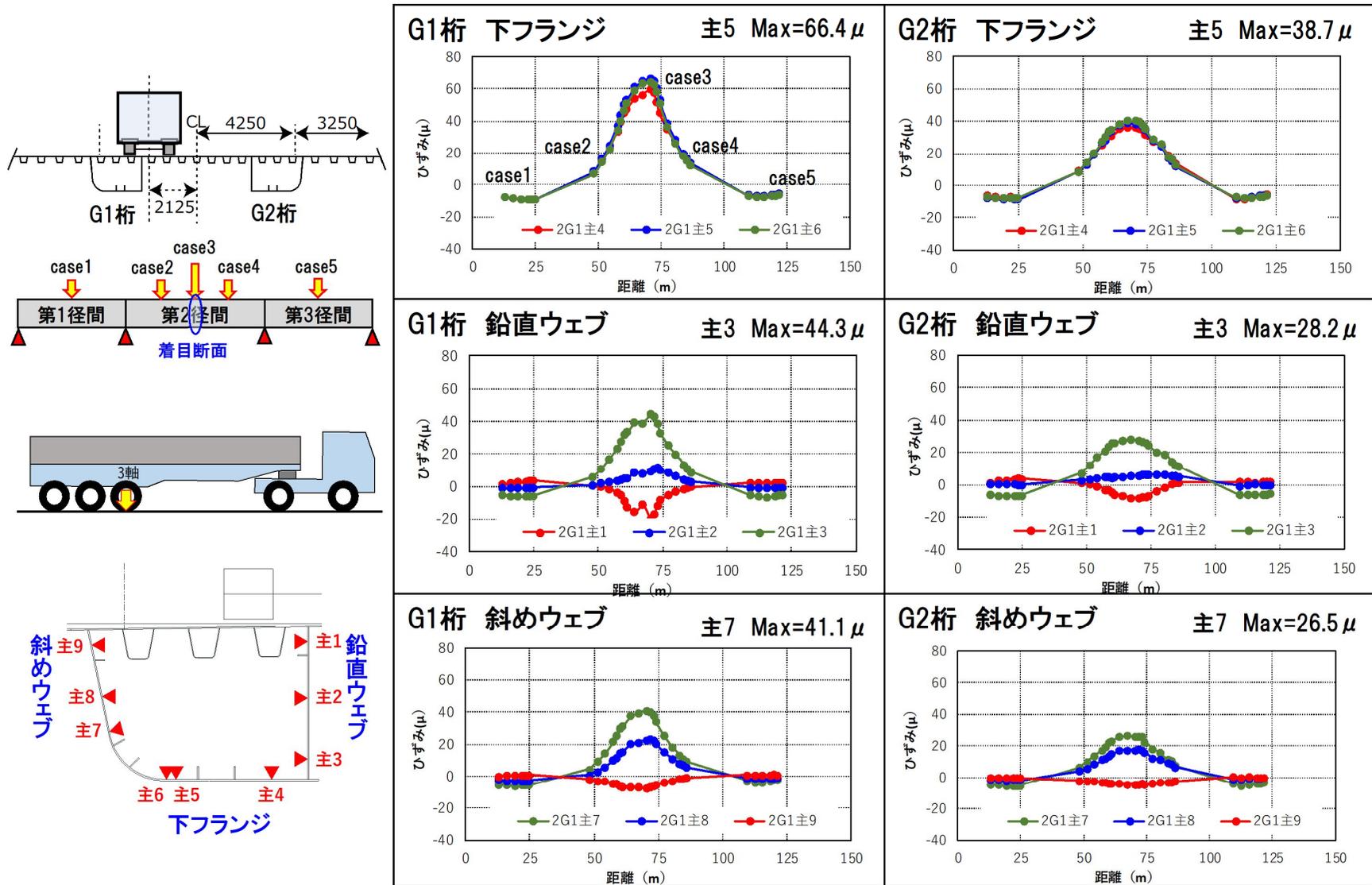


図-4.17 環八跨道橋における載荷試験概要



静的載荷試験結果 G1桁上に42t荷重車載荷時の影響線(第2径間支間中央)

図-4.18 環八跨道橋における載荷試験結果

(2) 3次元 FEM モデルのアップデートによる再現性の検証

橋梁の各部位について、載荷試験結果等を参考に精緻にモデル化することにより、実測値に対して93%程度の再現性が確認された。図-4.19に3次元 FEM モデルのアップデートについて示す。今回、デジタルツインに使用する精緻なモデル化を検討したが、実測値に対して、図-4.20に示すような若干の乖離がある点については、ここで示すようにG1桁A2橋台支承の変位は実測値と解析値とで異なっており、可動支承の挙動が再現されていない可能性が示唆された。

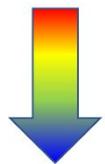


G1桁・第2径間(中央径間)中央部でのひずみ

実測値は66.4 μ

モデル	ひずみ(μ)	実測値に対して(%)
鋼桁+舗装	87.2	131.3 (76.1%)
鋼桁+舗装+歩道	79.4	119.6 (83.6%)
鋼桁+舗装+歩道+化粧板	73.7	111.0 (90.1%)
鋼桁+舗装+歩道+化粧板+高欄	71.6	107.8 (92.7%)

精緻化



() は、解析値に対する比率

図-4.19 3次元 FEM モデルのアップデート

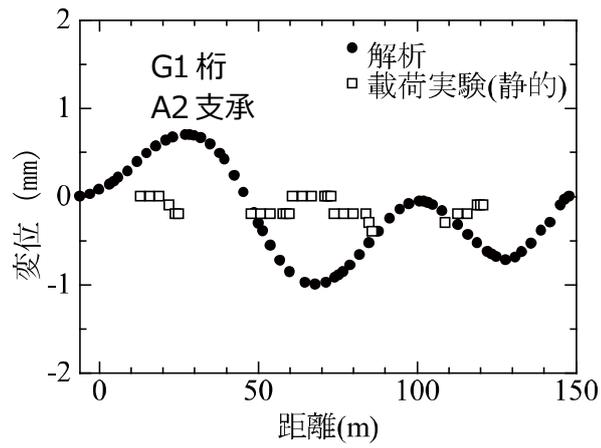


図-4.20 支承 (A2) の挙動 (解析と実測)

4.2.2 で試行した 3D デジタル野帳システムとデジタルツインモデルとの連携方法について、図-4.21 に示す。

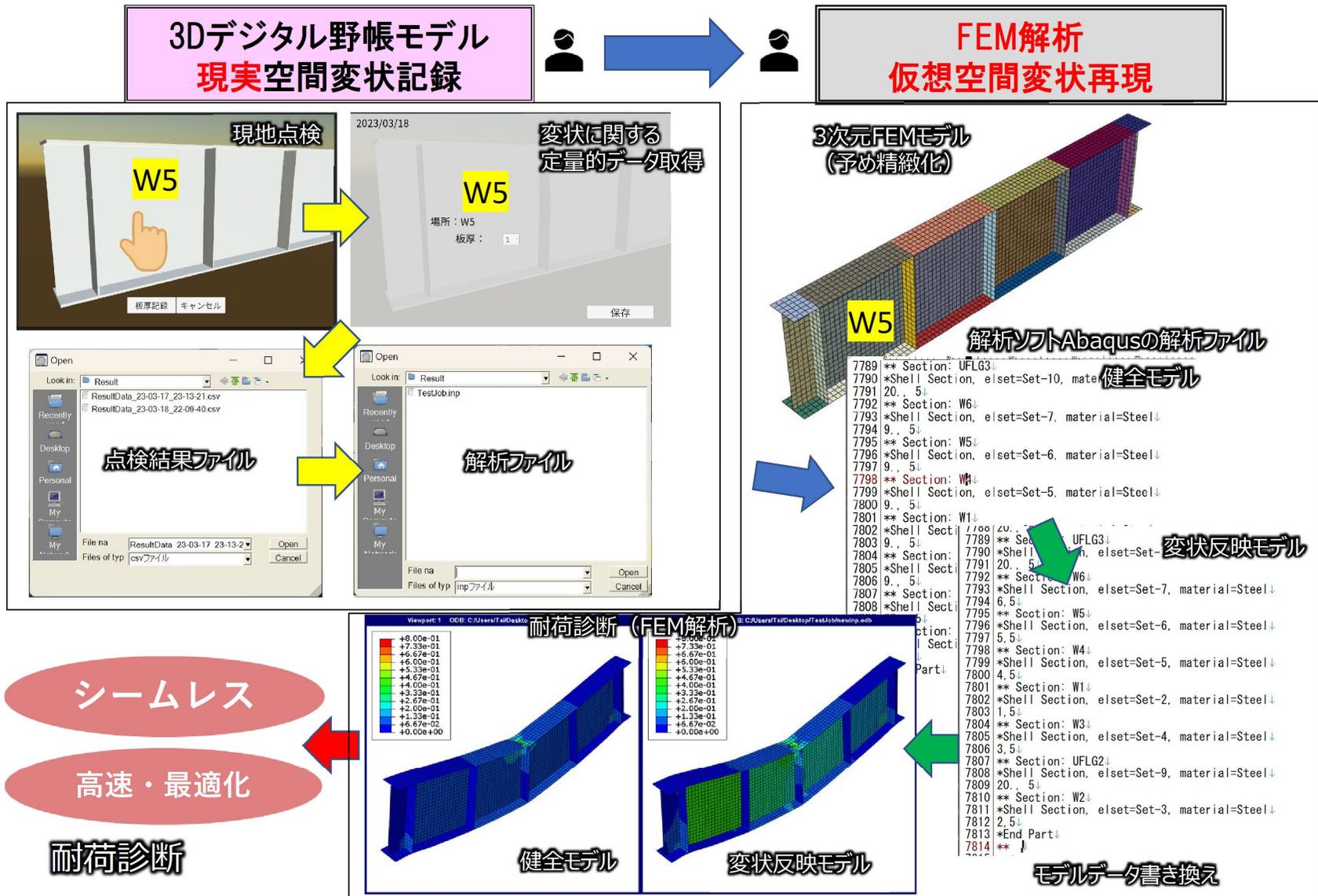


図-4.21 3D デジタル点検野帳とデジタルツインモデルの連携

4.2.5 最先端計測機器の性能検証

令和4年度インフラスマートマネジメントにおいては、施設の状態や挙動を把握する種々なデータの取得が基本となっている。このようなことから、今後、現在進めているインフラスマートマネジメントや既設構造物の自然災害発災時の安全性確認及び他事業による近接施工による影響等を把握するために必要なデータの取得が必要不可欠であり、データ取得を確実に行うことが可能な最先端の計測機器を調査し、性能を確認することとした。今回は、選択した規則機器の使用性や要求性能がどの程度までニーズを満たしているかについて検証を行っている。今回の検証を行うフィールドは、デジタルツインとして開発中の3Dデジタル野帳とFEMモデル、実車両を使った载荷試験（静的、動的、応力頻度計測）を行った環八跨道橋を対象とした。検証を行った計測機器は、高精度傾斜計、ポータブル傾斜計及びドップラー変位計測器である。

(1) 高精度傾斜計及びポータブル傾斜計によるたわみ計測の検証

MEMSを活用した高精度傾斜計及びポータブル傾斜計について、それぞれの計測器の特徴を示す。高精度傾斜計は、構造物の微細な動きによる動的及び静的な変形量を計測し、表示することが可能である。また、ポータブル傾斜計は、構造物の微小な傾斜を簡易に計測することが出来、計測したデータをIoT端末とクラウドを介して、何処でも表示、保存が可能な機器である。今回、両計測器について、汎用性と精度について検証を行った。図-4.22に高精度傾斜計及びポータブル傾斜計の概要を示す。

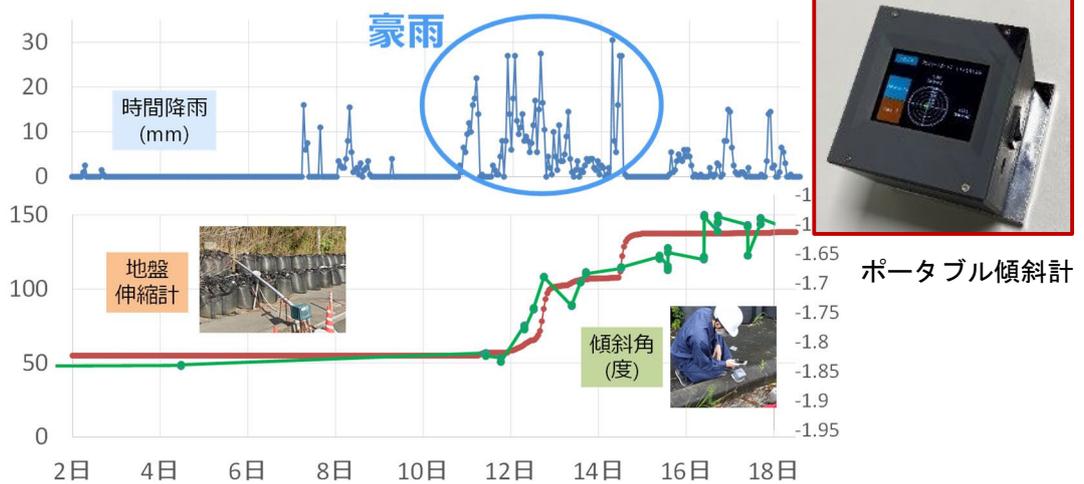
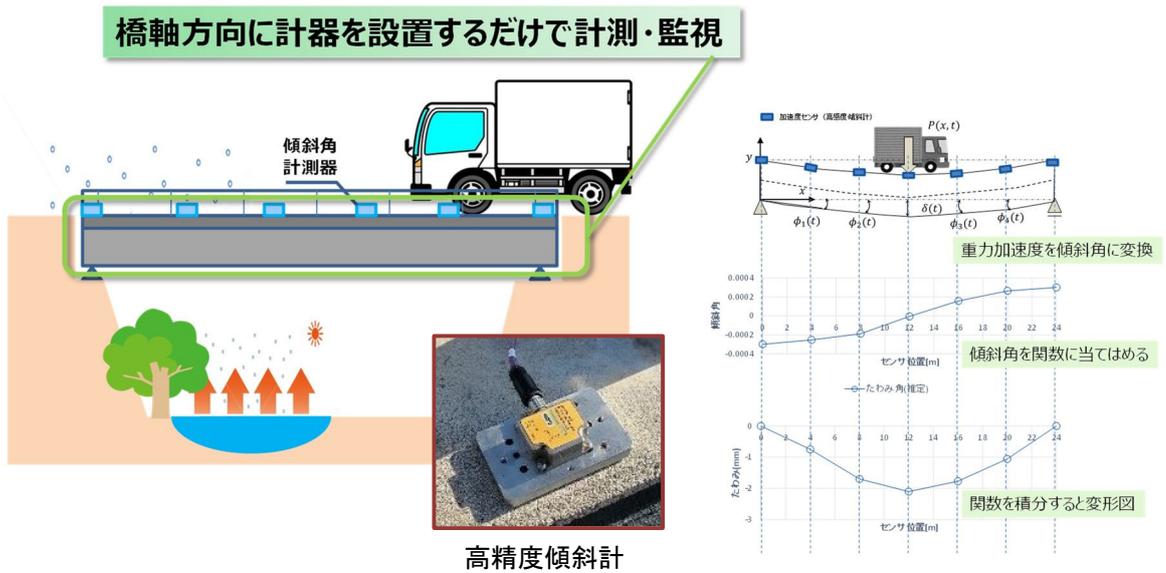


図-4.22 高精度傾斜計及びポータブル傾斜計

高精度傾斜計及びポータブル傾斜計は、MEMS を活用した計測機器であり、構造物に荷重が作用した時に生じる微細な傾斜角から、構造物の変形形状を示すことが可能である。MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) とは、近年採用が急速に伸びているマイクロサイズの電気機械システムで加速度を高精度で計測する計測器である。

図-4.23 に環八跨道橋の高精度傾斜計とポータブル傾斜計の精度検証を行った機器設置の詳細を示す。

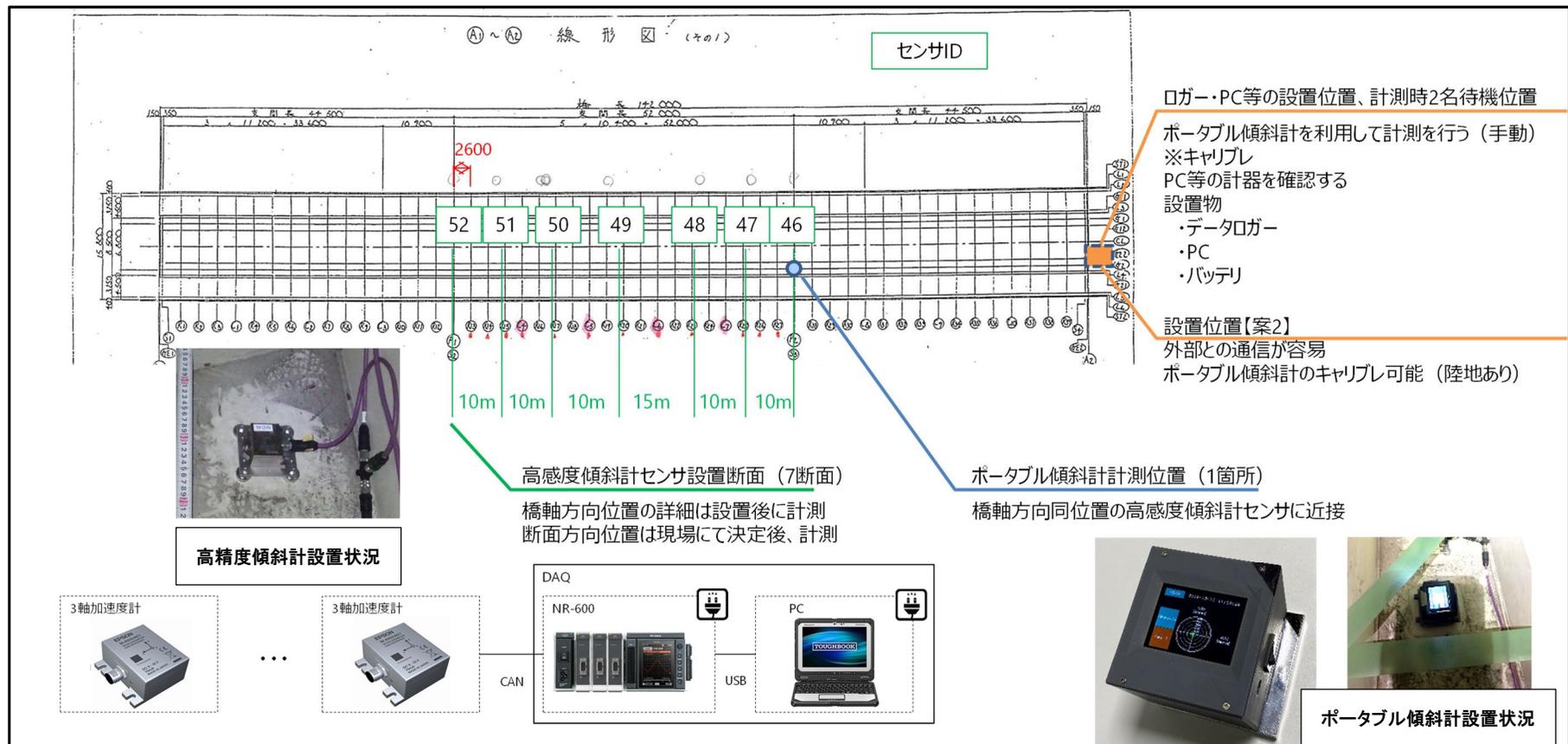


図-4.23 高精度傾斜計及びポータブル傾斜計

図-4.24 に動的載荷試験実施時の高精度傾斜計とポータブル傾斜計それぞれの計測角度を示す。青実線が高精度傾斜計、赤丸がポータブル傾斜計の実測計測値であるが、図でも明らかなように計測値は一致している。

また、図-4.25 に高精度傾斜計による G1 桁の変形図を示す。ここに示す精度検証から、車両が通行時の桁の動きや変形状態を確認する方法として、高精度傾斜計の活用可能と判断できる。また、ポータブル傾斜計は、計測必要箇所に容易に運搬、設置することが可能であり、クラウドを介して計測データをデータベース等に保存、表示が可能なることから要求性能を満たしていると判断される。ポータブル傾斜計の活用方法として、直近に迫った JR 羽田アクセス線の工事による既存道路橋の受け変えや近接工事による影響確認時に当該計測器の活用が想定される。

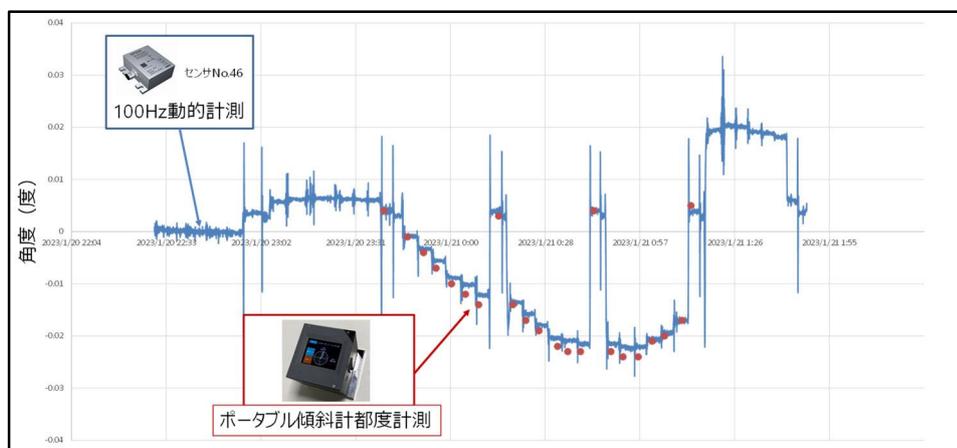


図-4.24 高精度傾斜計とポータブル傾斜計の計測傾斜角度

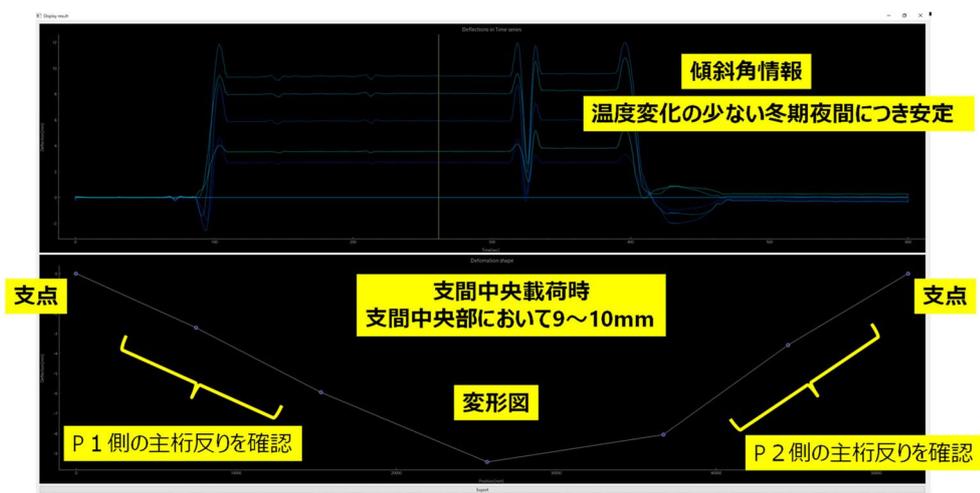


図-4.25 高精度傾斜計による主桁変形（動的 42T 載荷試験時）

(2) レーザードップラーによるたわみ計測の検証

構造物の変位を計測する方法としては、従来機械式変位計測器を使用していたが、近年はレーザー式変位計の使用が急速に増えている。今回環八跨道橋の動的載荷時の主桁変位計測には、レーザー式変位計を使用しているが、中央径間は主要幹線道路が桁下にある、一般的なレーザー式変位計は据え付けが困難なことから、レーザードップラー式変位計を使うこととした。レーザードップラー式変位計は、レーザー光を使用して対象構造物表面の動きによって光の周波数が変化するドップラーシフトを検出し、速度や変位を計測する仕組みである。図-4.26は、レーザー式変位計が設置できる環八跨道橋の側径間で精度検証した結果を示している。レーザー式変位計で計測した変位量8.80mmに対しレーザードップラー式変位計で計測した変位量が8.01mmであり、誤差0.79mmである。また、図-4.27に中央径間のレーザードップラー式変位計と先に示す高精度傾斜計の計測結果を示した。レーザードップラー式変位計で計測した変位量最大値12.0mm、最小値2.9mmに対し、高精度傾斜計で計測した変位量最大値11.2mm、最小値3.1mmと最大値で0.8mm、最小値で0.2mmであった。

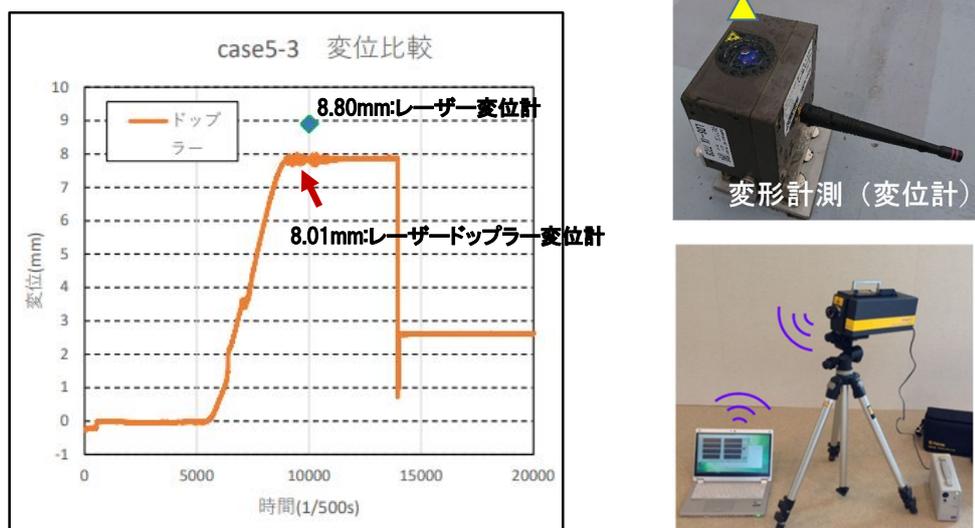


図-4.26 レーザー式とレーザードップラー式変位計比較

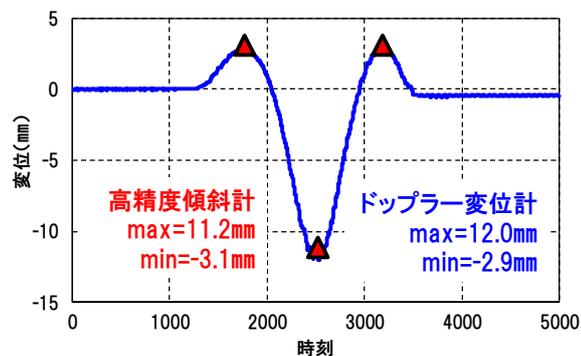


図-4.27 高精度傾斜計とレーザードップラー式変位計比較

(3) 支承部の変位計測の検証

次に、支承の変位を計測する目的で、レーザー式変位計と従来使用していた機械式接触変位計の計測結果を示す。機械式接触変位計は、計測器に土砂や塵埃が堆積すると精度が低下することから、今回、レーザー式変位計が代替できるか精度検証を行った。図-4.28 はレーザー式変位計の計測結果、図-4.29 は、機械式接触式変位計の計測結果を示す。

橋軸方向最大値の比較では、レーザー式変位計が 0.35mm に対し、機械式接触式変位計は 0.40mm と 0.05mm の差異が確認された。支承の変位による道路橋の健全性を判断する方法としては、従来の機械式接触変位計が実績は多いが、今回の精度検証結果からレーザー式変位計でも十分性能は満足する結果である。

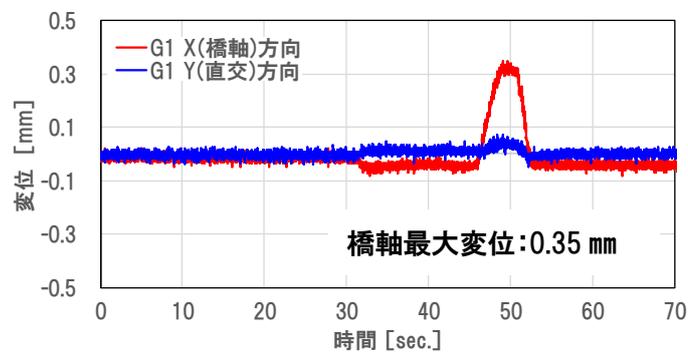


図-4.28 変位計測結果：レーザー式変位計

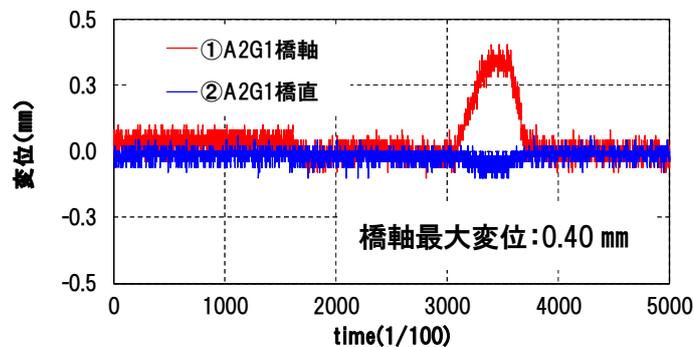


図-4.29 変位計測結果：接触式変位計

(4) MEMS センサーによる変位計測とひずみゲージによる応力計測

MEMS の変位データとひずみゲージの応力ひずみデータの動きについて、対比した結果を図-4.30 に示す。比較した目的は、荷重車が通行した際にどの程度同様な動きをするかを確認する目的であることから、精度検証とは趣旨が異なっている。なお、走行した荷重車の重量は 20 トンである。環八跨道橋が箱桁であることから、動きには変位とひずみには差異があるが、同傾向の動きをしていると判断する。

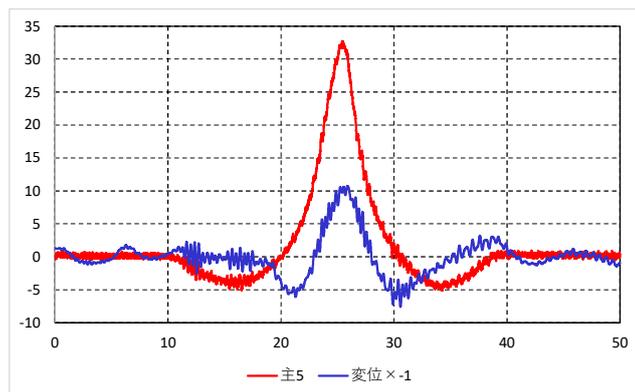


図-4.30 MEMS とひずみゲージデータの比較