

軌道・構造物メンテナンスの高度化

構造物技術研究部長
神田 政幸



1. はじめに

鉄道の安全、かつ安定的な運行には、鉄道設備のメンテナンスが必要不可欠である。法令等に基づき、鉄道設備のメンテナンスである、定期検査や診断が実施され、結果に応じた補修・修繕・補強・取替が行われる。しかしながら、少子高齢化と労働人口の減少が進む中で、メンテナンス要員の確保と人材育成・技術継承に課題を有する。一方、鉄道設備は、種類に応じ寿命や耐用年数が異なる上、鉄道沿線に大量かつ、多種類が存在し、その経年に起因するメンテナンスの業務量の増大が懸念されている。さらに、2020年初から発生・拡大した新型コロナウイルス感染症の対応をめくり、大規模かつ急激な社会の変化をもたらしてきた。現在、コロナ禍後の社会変化に対応すべく、各鉄道事業者においては鉄道経営の効率化に資する鉄道設備のメンテナンス業務の、デジタルシフトが精力的に進められている。したがって、鉄道設備のメンテナンスについては、デジタル技術の活用により、鉄道設備の状態監視

や検査の自動化、機械化による省力化・省人化のほか、対象設備によっては検査周期の延伸や異常検知精度の向上により、TBM (時間計画保全) からCBM (状態監視保全) への移行が求められている¹⁾。

本講演では、鉄道設備として軌道・構造物を中心に、検査・診断の省力化・省人化策を概説し、今後の軌道・構造物の検査・診断の革新に向けた取り組みについて述べる。

2. 軌道・構造物メンテナンスの現状と課題

鉄道設備では、その機能・性能や劣化・損傷の特徴、補修・修繕・補強・取替の容易さを考慮し、種類に応じ寿命・耐用年数が異なる。一般的に軌道よりも構造物が寿命・耐用年数が長い。これらの設備のメンテナンスでは、省力化策・省人化策のほかに、検査周期の延伸、異常検知の精度向上が課題として求められる。軌道では、検査周期を延伸することで、省力化・



図1 軌道・構造物のメンテナンスの課題

省人化に貢献する。一方、比較的寿命の長い構造物では、省力化策・省人化策のほかに、老朽化対策が必要とされる(図1)。これらの設備の検査の省力化・省人化のためには、自動化、高速化、かつ効率化が必要となる。一方、診断では検査周期の延伸や異常検知の精度向上

が求められ、診断の定量化、高精度化、かつ簡易なものが必要となる。軌道では、診断精度を向上させることで、TBMの定期検査からCBMへの展開が可能となり、検査周期の延伸に繋がる。一方、構造物では精緻な診断により、重篤と診断される個別検査対象数の適正化

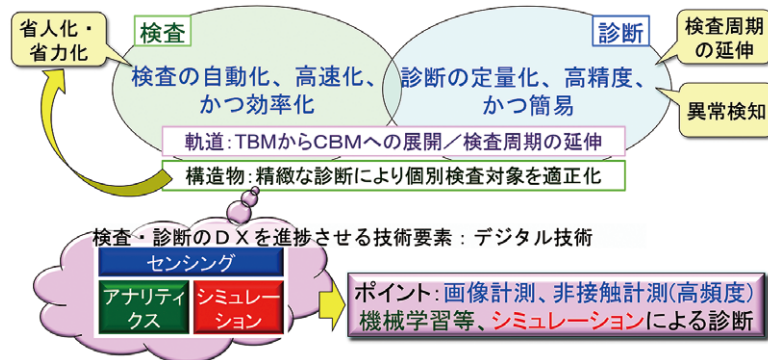


図2 軌道・構造物の検査・診断の研究の方向性



図3 軌道の検査・診断に関する研究事例



図4 構造物の検査・診断に関する研究事例

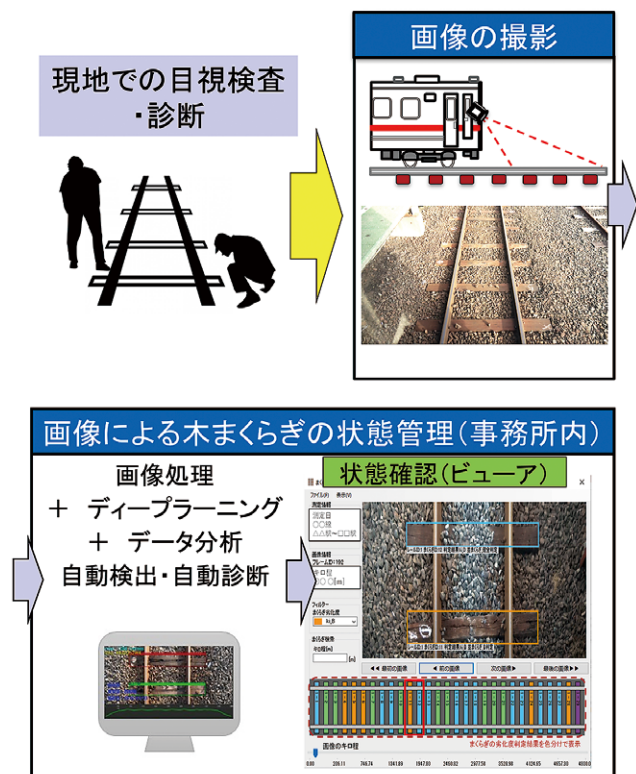


図5 木まくらぎ劣化度判定システム

が可能となる。これらの検査・診断に対する取り組みにより、さらなる省力化・省人化へと繋がる(図2)。

これらの検査・診断の技術向上策、これを検査・診断DX(デジタルトランスフォーメーション)とここでは呼ぶとするが、これを進捗させるには、センシング、アナリティクス、そしてシミュレーションのデジタル技術が必要となる。鉄道総研は、データアナリティクスやシミュレーション技術に長けた研究者集団であることが強みであり、データアナリティクスやシミュレーションに注力し、診断技術や鉄道の技術基準の知識・ノウハウを生かした検査・診断のDXを進捗させる研究開発を行うのがよい。

以下では、鉄道総研の軌道と構造物の検査・診断に関する研究事例を紹介する。

3. 軌道・構造物の検査・診断の省力化策・省人化策

軌道では、検査・診断の省力化・省人化を目的に、センシング、アナリティクスを活用した検査・診断や、従来の軌道検測データに新たなアナリティクスを適用した診断の研究開発を行っている(図3)。構造物では、同様に検査・診断の省力化・省人化を目的に、センシ

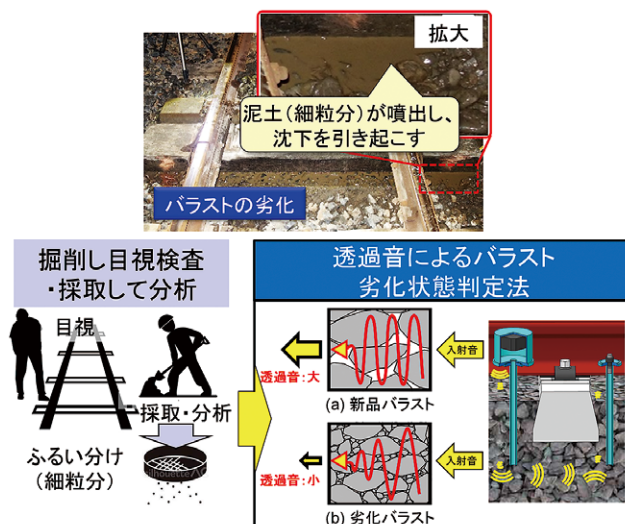


図6 透過音によるバラスト劣化状態判定法

ング、アナリティクスを活用した検査・診断や、軌道検測データを構造物の異常検知や診断に適用した研究開発を行っている(図4)。

以下では、軌道分野において「木まくらぎ劣化度判定システム」、「透過音によるバラスト劣化状態判定法」を、構造物分野において「3次元画像による構造物目視検査支援システム」、「トンネル検査支援システム」を紹介する。

3.1 軌道分野

「木まくらぎ劣化度判定システム」^{2),3)}は、木まくらぎの検査・診断の省力化・省人化を目的に開発したものである(図5)。従来、木まくらぎの検査・診断は、徒歩による目視で行ってきた。新たなシステムでは、車上からの動画撮影、画像処理、ディープラーニング、データ分析により木まくらぎの自動検出、自動劣化診断を行うものである。従来、目視による検査・診断から、木まくらぎの自動検出、自動劣化診断に変更することで、低コストかつ簡易な機材により撮影することはもちろんであるが、自動化、高速化、かつ定量的な診断に移行し、検査・診断の省力化・省人化に寄与する。

「透過音によるバラスト劣化状態判定法」⁴⁾は、バラストの劣化状態の検査・診断の省力化・省人化を目的に開発したものである(図6)。バラストが劣化・細粒化すると噴泥により軌道の沈下を引き起こし、これを避けるためバラスト交換が行われる。従来、バラストの劣化状態の検査・診断はバラストを掘削し目視による診断や、試料を採取してのふるい分け等の分析によるが、時間と労力を要する。本判定法は透過音のバラ

スト内の伝播のしにくさを、バラストの劣化度の指標としたものである。バラストを掘削し目視、あるいは採取しての分析であった検査・診断から、掘削や試料採取のない短時間、かつ定量的な判定法に変更することで、検査・診断の省力化・省人化を実現する。

3.2 構造物分野

「3次元画像による構造物目視検査支援システム」⁵⁾は、構造物の全般検査時の目視による検査・診断の精度向上と、これによる個別検査対象数の適正化による省力化・省人化を目的に開発したものである(図7)。従来、構造物の全般検査は、徒歩巡回時の遠方目視で行ってきた。新たなシステムでは、巡回時に画像データを取得し、SfM (Structure from Motion) により、3次元画像の構造物を作成する。過去の巡回時に作成した3次元画像を、次の巡回時に携帯端末等で持参し現地構造物と直接的に比較できる。さらに現地での再検査を要する場合、現地の再調査は不要でPC内の3次元画像の構造物に対して、熟練技術者の指導を仰ぎな

がらの目視検査が可能となる。遠方目視による構造物の検査・診断から、携帯端末等の3次元構造物と現地構造物の直接比較により、検査・診断の精度向上が期待でき、これまで安全側に診断し個別検査対象数が増加する傾向であった全般検査において、個別検査対象数を適正化することで、省力化・省人化が可能となる。なお、本システムはアジア航測(株)との共同研究で実施した。

「トンネル検査支援システム」⁶⁾は、トンネルの全般検査時の目視による検査・診断の省力化・省人化を狙ったものである(図8)。トンネルの全般検査は列車間合いの限られた時間内で、暗中で遠方目視による特殊な検査・診断である。さらに検査対象が大きい上、同じ形状のトンネル覆工が連続するため、変状のひびわれ、剥落や漏水などの位置の特定が難しい。このためトンネルの検査・診断の信頼性は、他の明かりの構造物のそれと比較して低下する可能性が高く、より検査・診断に時間と労力を要することとなる。本システムは、画像撮影しひび割れ検出した画像データから、画像処理、ディープラーニング、データ

分析によりひび割れ、剥落や漏水等の変状を自動抽出し、覆工目地間のトンネル覆工断面の健全度診断、及び剥落等の要注意箇所選定を行うものである。加えてこれらの健全度診断結果や要注意箇所を現地のトンネル覆工へ投影し、全般検査の目視検査支援を行う。遠方目視によるトンネルの検査・診断から、撮影画像から健全度判定、要注意箇所の抽出のほか、現地での目視検査支援機能により、検査結果とこれらの位置同定の精度が向上し、これによりトンネルの検査・診断の時間と労力を減ずるとともに、個別検査対象数を適正化することで、さらに省力化・省人化が可能となる。



図7 3次元画像による構造物目視検査支援システム

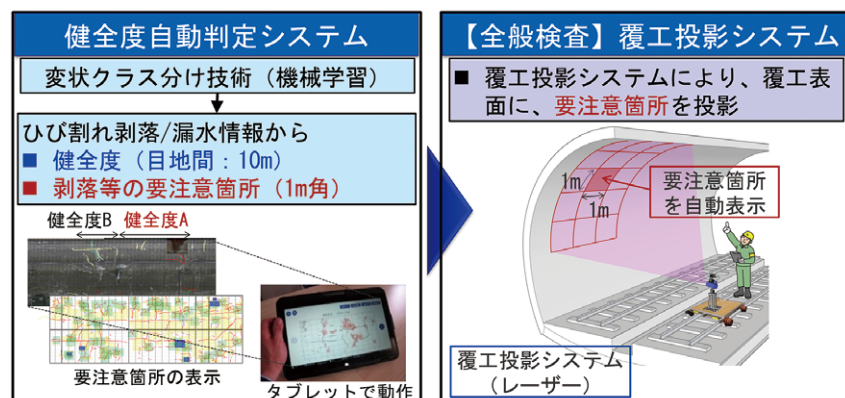


図8 トンネル検査支援システム

4. 今後の軌道・構造物の検査・診断の革新

ここまで軌道・構造物の系統内の検査・診断に対して、デジタル技術により省力化・省人化を図る

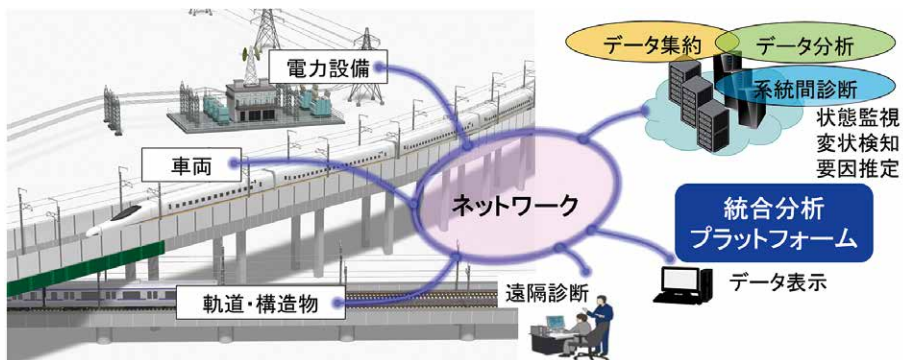


図9 システム連携による鉄道設備のメンテナンス

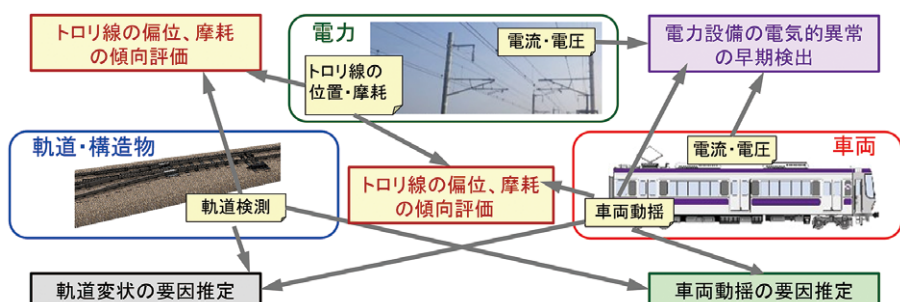


図10 システム間で相互に関連する鉄道設備の変状

研究事例を示した。鉄道総研では、システムを超えた鉄道設備全体のメンテナンスの省力化・省人化を目的として、現在、統合分析プラットフォーム、ネットワークを介してシステム連携による鉄道設備のメンテナンスのDXの実現に向け取り組んでいる(図9)^{7,8)}。鉄道システムは、車両・軌道・構造物・電力・信号・通信等からなる巨大、かつ複合システムである。鉄道設備のメンテナンスに関わる、設備の変状や故障が相互に関係し、主要因は自システムではなく他システムの可能性もある。例えば、軌道変状の要因は、軌道・構造物、あるいは車両の可能性がある。同様に車両動揺の要因は、軌道・構造物、あるいは車両の可能性もある。トロリ線の偏位、異常摩耗の要因は、軌道・構造物、電力、あるいは車両の可能性もある。電力設備の電氣的異常の要因は、電力、あるいは車両の可能性もある(図10)。

しかしながら、鉄道設備の変状や故障が生じた場合、自システム内で対応するのが、鉄道設備のメンテナンスの現状である。そこで、相互連携により他システムのメンテナンスデータを一元管理し、データ分析を行うことで、要因分析・推定、影響の把握が容易になり、かつ効果的な対策を実現する可能性がある。ここで必要となる

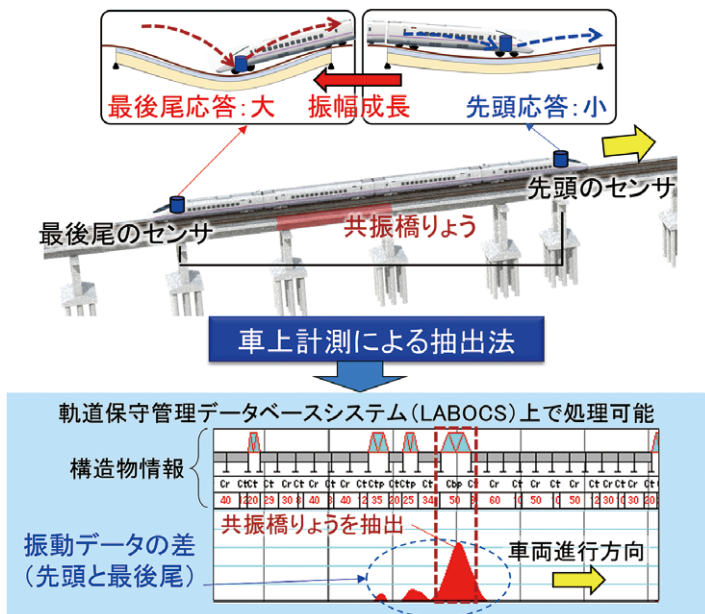


図11 検測データによる共振橋りょうの抽出法

のが、統合分析プラットフォームである。

統合分析プラットフォームが有用となる、車両・軌道・構造物間で相互に関連する現象と、システム間データ連携による対応の例として、「検測データによる共振橋りょうの抽出法」⁹⁾を挙げる(図11)。鉄道車両が高速走行すると、共振橋りょうが発生する場合がある。

このような場合、列車の走行時に地上からの橋りょうの桁の振動計測により、共振橋りょうの抽出が行われてきた。本抽出法は、車上検測データを活用し、先頭車と最後尾車の振動データの差分の増幅の有無により、共振橋りょうを抽出するものである。共振橋りょう上の電車線設備も同様に共振する場合があります¹⁰⁾、車両・軌道・構造物・電力間で相互連携を図ることで、関連する設備の状態監視、診断・予測・変状要因の推定、そしてシステムを超えた対策の実現が可能となる。

4.1 統合分析プラットフォーム

統合分析プラットフォームは、統一キロ程の考え方を導入し統一キロ程を介して、他システムの設備の位置情報を自システムのキロ程に変換し、一元管理することができる¹¹⁾。また、他システム設備のメンテナンスデータ間で、容易に相互分析可能なように、分析ツールを備える(図12)¹²⁾。また、他システム業務を乱すことない、ミラーサーバーにより統合分析プラットフォームは独立したシステムであり、かつミラーサーバーは全システムデータ

のバックアップ機能を有する。

統一キロ程は、他システム設備の位置情報を自システム内で一元的に扱うため、軌道中心位置を緯度、経度で表したものである(図13)。統一キロ程のデータは、鉄道事業者が所有するGIS位置情報、あるいは曲線台帳と航空写真の組み合わせによる算出や、車上GPS計測により新たに取得することもできる。これにより、他システム設備の位置情報について、統一キロ程を介して相互変換可能となる。例えば、軌道の管理キロ程で、構造物、電力設備の位置を確認し、その設備の状態を示す経時変化情報を確認することができる。

統合分析プラットフォーム適用の例として、車両前方画像による鉄道設備等の概要表示機能^{13), 14)}がある。これは、車載カメラ画像、線路周辺の鉄道設備、携帯端末による車上GPS情報や、列車動揺の情報を統一キロ程により1画面に示したものである(図14)。鉄道設備の概要情報として有用であり、統合分析プラットフォームのフロント画面として活用し、軌道・構造物・電力設備等の列車巡視の代替になりうる機能を備

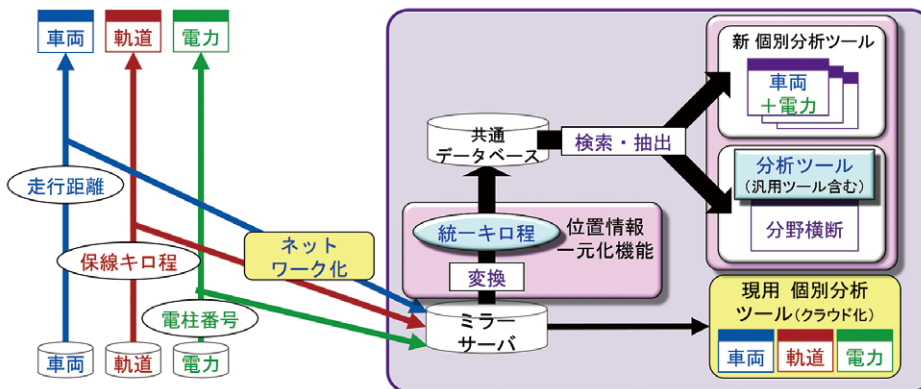


図12 統合分析プラットフォームの機能

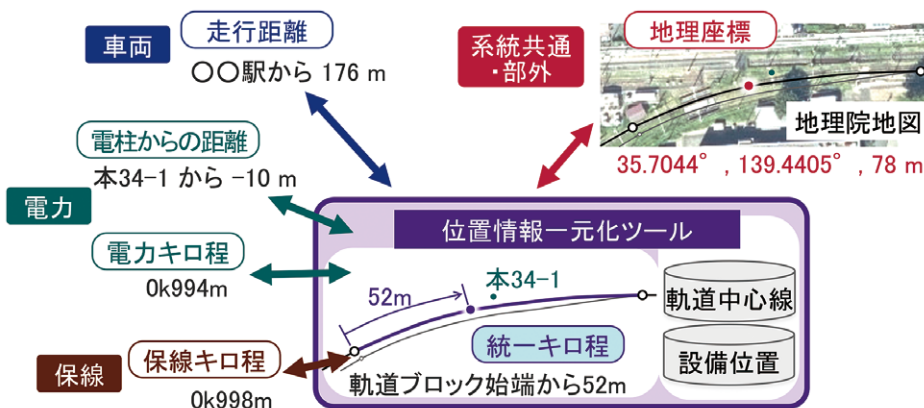


図13 統一キロ程によるデータの一元管理

えるとともに、携帯端末で同情報を部外で閲覧可能とすることで、徒歩巡回や列車巡視時に携帯し、軌道・構造物・電力設備の検査・診断の支援に役立つものと考えられる。

4.2 系統間連携と組織間連携による軌道・構造物の検査・診断のDXの実現

最後に今後の軌道・構造物の検査・診断の革新に繋がる取り組みを示す。

統合分析プラットフォームにより、軌道・構造物の状態監視、変状の進行推定、自動診断を実現することで、系統を超えた検査・診断の省力化・省人化の実現を目指す(図15)。特に高頻度の車上計測において、計測項目が多様多様となることで、軌道・構造物の検査・診断のさらなる省力化・省人化に繋がる可能性を有する。統合分析プラットフォームには、車上計測データのほか、携帯端末による軌道・構造物の目視検査データや現地試験データを集約すると同時に、鉄道総研の強みである、系統間分析ツールやAI等のデータアナリティクスツール、各種シミュレーションツールを備える。鉄道事業者内の全技術者・研究者が、いつでも容易に軌道・構造物、あるいは他系統の関連する設備の相互の状態監視、変状



図14 車両前方画像による鉄道設備情報の表示

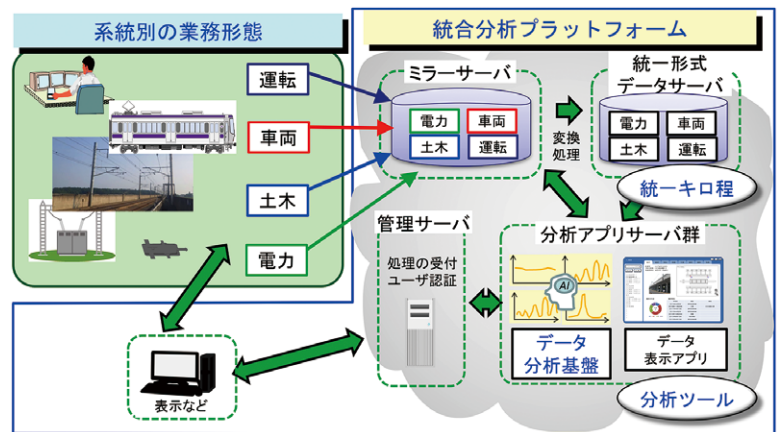


図15 系統間連携と統合分析プラットフォーム



図16 系統間連携による軌道・構造物の検査・診断のDX

の進行推定、自動診断、そしてシステムを超えた対策に繋げることで、真の軌道・構造物の検査・診断のDXに達するものと考えられる(図16)。

以上のようにシステム連携を促進し、軌道・構造物の検査・診断の省力化・省人化、そして効率化、DXの実現に資する、統合分析プラットフォームの軌道・構造物の活用例を示した。このほか、検査・診断のDXを実現し、さらにスピードアップを図る方法として、各組織が有する軌道・構造物の検査・診断等のメンテナンスデータの共有がある。これは、診断に関わる分析、要因推定、対策提案のアナリティクスやシミュレーションの研究開発を促進させることに繋がる。例えば、AI(機械学習)での教師データの共有である。特に軌道・構造物は鉄道運行の安全に直結し技術基準に関わることから、軌道・構造物のメンテナンスデータの共有に対して、鉄道事業者間で共通の認識を有することから、確実なセキュリティのもと一定の理解が得られるものと考えられる。また、統合分析プラットフォームはシステム連携だけではなく、組織間連携にも貢献するツールとなる。

5. おわりに

本講演では、鉄道設備として軌道・構造物を中心に、検査・診断の省力化・省人化策を概説し、今後の軌道・構造物の検査・診断の革新、検査・診断のDXの実現に向けた取り組みについて述べた。軌道・構造物の検査・診断の省力化・省人化に関わる研究開発を進捗させるには、軌道・構造物に限らず他システムも同様であるが、研究開発のみならず、組織内運用方法・体制等の仕組みづくりも含めた研究アプローチが必要である。本講演で示した、統合分析プラットフォームはシステム連携を柔軟、かつ現業務と独立して施行可能なシステムであり、施行運用のハードルは高くない。また、鉄道の安全に関わる軌道・構造物のメンテナンスデータの共有により、診断に関わるアナリティクスやシミュレーションの研究開発のスピードアップを論じた。

今後とも鉄道総研の軌道・構造物も含め鉄道設備のメンテナンス研究、及び研究成果の実務への実装に、継続的に御支援と御協力をお願いしたいと考えている。

参考文献

- 1) 村本勝己：持続可能な安全を実現するメンテナンスの高度化，第31回鉄道総研講演会，pp.33-40, 2018.11

- 2) 糸井謙介，長峯望，合田航，坪川洋友，加藤爽：列車前方画像を用いた木まくらぎ検査手法の精度，第28回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL 2021)，2021.12
- 3) 長峯望，坪川洋友，合田航，前田梨帆，加藤爽，糸井謙介：列車前方画像を用いた画像解析による軌道設備の検査，鉄道総研報告，Vol.36，No.12, 2022.12(予定)
- 4) 中村貴久，桃谷尚嗣，木次谷一平，北川敏樹，宇田東樹：透過音でバラスト軌道の碎石の劣化状態を検査する，RRR，Vol.78，No.8，pp.12-15, 2021.8
- 5) 小林裕介，松丸貴樹，長峯望，新名恭仁：SfM技術による三次元モデルを用いた目視検査支援システム，日本鉄道施設協会誌，Vol.57，pp.32-33, 2019.2
- 6) 大原勇，仲山貴司：ディープラーニングを用いた開削トンネルの健全度自動判定の試行，土木学会第77回年次学術講演会概要集，2022.8
- 7) 神田政幸：デジタルメンテナンスによる省力化，第32回鉄道総研講演会，pp.17-24, 2020.2
- 8) 平栗滋人，神田政幸：メンテナンス業務の革新に向けた研究開発とデジタル技術の活用，JRガゼット(JRgazette)，Vol.80，No.3，pp.36-40, 2022.3
- 9) 松岡弘大，上半文昭，田中博文：列車走行により共振する橋りょうを抽出する，RRR，Vol.78，No.5，pp.20-23, 2021.5
- 10) 常本瑞樹，松岡弘大，後藤恵一，薄広歩，以倉慶子：鉄道橋りょう上の電線が損傷する要因を解明する，RRR，Vol.78，No.12，pp.4-7, 2021.12
- 11) 流王智子，河村裕介，羽田明生，栗田いずみ：分野をまたがる鉄道メンテナンスデータの統合分析プラットフォームの開発，鉄道総研報告，Vol.36，No.8，pp.51-56, 2022.8
- 12) 栗田いずみ，河村裕介，羽田明生，流王智子：鉄道メンテナンスデータ用統合プラットフォームにおけるデータ分析ツール群の開発，電気学会電子・情報・システム部門大会，2022.8
- 13) 吉田尚史，田中博文，西本正人，三和雅史：キロ程ベースでの位置情報一元化による鉄道設備統合管理システム，鉄道総研報告，Vol.35，No.4，pp.41-46, 2021.4
- 14) 合田航，長峯望，向嶋宏記，糸井謙介，坪川洋友：列車前方画像を用いたオプティカルフローによるキロ程推定，電気学会交通・電気鉄道研究会，TER-21-059，pp.17-22, 2021.7