

鉄道メンテナンスの革新を支える 情報・ネットワーク技術

公益財団法人鉄道総合技術研究所 信号・情報技術研究部長
平栗 滋人



1. はじめに

鉄道では、メンテナンスの対象となる設備の多くが線路に沿って、広い範囲に分布しているほか、車両に代表される移動体も含まれているという特徴がある。このような条件において、状態監視保全のための「認知」を効率よく実現するためには、現場で検知した状態データを、何らかの通信手段を用いて伝送、集約することが必要である。また、「予測」のためには、得られたデータを分析する必要がある。このためには、近年、進展が著しいICT (Information and Communication Technology) の活用が有効な手段となる。

ICTの活用により、大量のデータが得られることが想定され、これらを効率的、迅速に処理する環境も必要となる。また、異なる分野のデータを関連づけることで、より高度なメンテナンスのための状態予測や、現象解明のための新たな知見や、価値を見出すことも期待される。このためには、分野間でのデータの相互参照、共有のための共通的なネットワーク基盤も必要となるものと考ええる。

本講演では、鉄道メンテナンスの革新に向けて、設備状態の認知、予測の視点から、ICTの役割を考察するとともに、信号設備を例として、研究開発の成果と取り組みを紹介する。さらに、鉄道メンテナンスの基盤となる情報技術、ネットワーク技術とこれを積極的に活用した、将来像について述べる。

2. 鉄道メンテナンスと情報・ネットワーク技術

鉄道は図1に示すように、多種、多様な設備を有しており、これらが線路に沿って広い範囲にわたって配置されている。これら条件を考慮すると、認知の初期である、現場のセンサーから状態データを取得する段階では、無線通信技術の活用が有効である

と言える。具体的には、近年、注目されているIoT (Internet of Things)、M2M (Machine to Machine Communication)、この活用形態の一つであるセンサーネットワーク¹⁾などが挙げられる。

このような手段で得た状態データは多種、多様、大量になることが想定される。認知の最終段階では、これらの蓄積、可視化だけでなく、関係箇所間での共有が必要となる場合も想定される。さらに、予測の段階では、データの分析、あるいはデータを活用したシミュレーションを実施することが想定される。これらを実現するためには、基盤となるネットワーク技術が必要となる。

この際、従来、多く見られたように、用途ごとに、その都度ネットワークを整備することは、効率的でない。この視点からも、鉄道で共通に使用できるネットワーク基盤の構築が必要と考える。鉄道の外部から得られるデータも含む、多様な大規模データの分析によって、従来は想定し得なかった知見を得、現象を解明し、それを状態監視保全の高度化に活用する可能するためにも、鉄道用途に適したネットワーク基盤の構築が必要と考えられる。

以上に挙げた技術と、メンテナンスにおける認知と予測との関係を図2に示す。また、メンテナンスの対象となる設備の状態認知に、センサーネットワークを利用した場合のイメージを図3に示す。



図1 鉄道における主なメンテナンス対象



図2 認知・予測と情報・ネットワーク技術

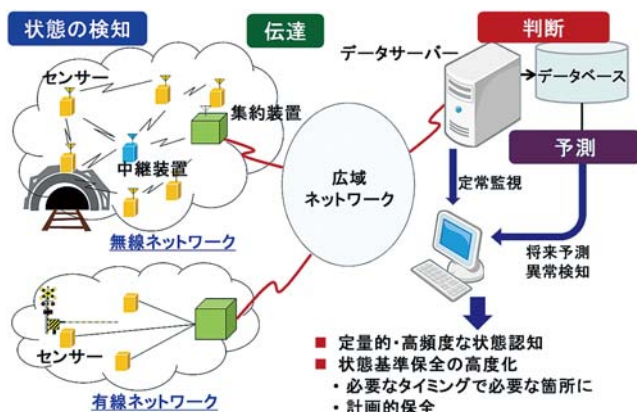


図3 ICTを活用した鉄道メンテナンス

3. 設備のメンテナンスにおける認知と予測

本章では、鉄道メンテナンスに関して、認知と予測の面からの現状と課題、最近の研究開発の取り組みについて、信号設備を例として述べる。

3.1 信号設備における状態認知

信号設備は、従来から、基本機能の一部としてフェールセーフを原則とする機能安全や、高い信頼度を確保する設計を前提としてきた²⁾。つまり、多重化や自己診断などの技術によって、装置自身が状態を認知し、それを何らかの形で出力できることが特徴と言える。

したがって、比較的以前から現場設備の状態を遠隔で認知する仕組みが使用されている³⁾。1960年代以降、踏切や転てつ機など、重要度の高い設備を対象として、故障状態を通知する集中監視装置(図4(a))が導入されている。また、1980年代からは、故障時だけでなく通常時の状態データを把握、収集できる状態監視システム(図4(b))の導入事例がある。

3.2 信号設備におけるメンテナンスの課題

3.1節で述べたように、信号設備では、比較的早期

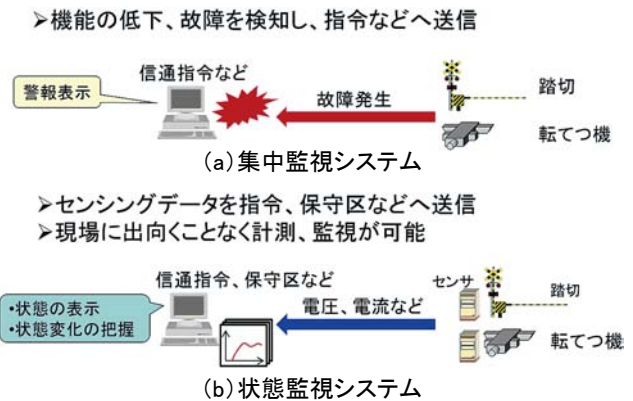


図4 信号設備の状態認知の事例

から装置の特性を活かした状態認知が行われ、状態データを取得できる状況になってきている。このほか、1980年代からは電子化された設備が導入されており、例えば、軌道回路の受信レベル自動調整など、メンテナンス作業自体を軽減できる技術⁴⁾も実現している。

その一方で、より高度なメンテナンスの実現に向けては、幾つかの課題も存在する。

信号設備は、軌道回路などのように常時動作していることを利用して、状態変化を認知できるものが多い。しかし、踏切での支障を運転士に報知する特殊信号発光機のように、常時は動作していない設備は、定期的な点検が必要となるが、その作業に多くの要員や時間を要している。

また、転てつ機のように構造上、電子化や多重化が難しい設備も存在し、メンテナンスに手間が掛かっている。

このほか、状態データを認知できる環境が整いつつある一方で、これらを有効に活用した状態予測に基づいたメンテナンスの実現も課題と言える状況である。

さらに、信号システムの電子化はメンテナンスの軽減に大きく貢献してきたが、電子化装置自体の使用環境に応じた取り換え計画など、予防保全に対する合理的な考え方を明確にすることも課題として挙げられる。

3.3 信号設備のメンテナンスに関する取り組み

(1) 特殊信号発光機の見通し検査システム

特殊信号発光機(以下、特発)は、約800m手前からの運転士への見通しの確保が要求される。その検査は、営業列車が走行しない時間帯(多くの場合、夜間)に実施されるが、1日に実施できる検査は、数か所に留まること、数名の要員を要すること、目視に依ることなど、作業の効率性や結果の客観性に課題がある。

これに対して、画像処理技術を活用することで、これら課題の解決を図った。

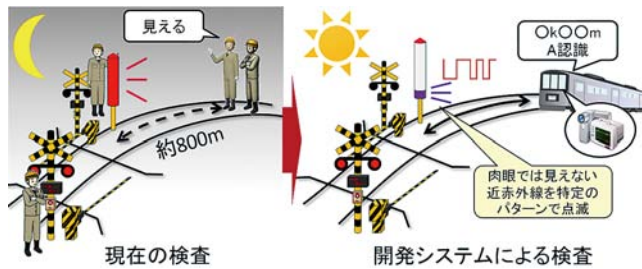


図5 特殊信号発光機の見通し検査

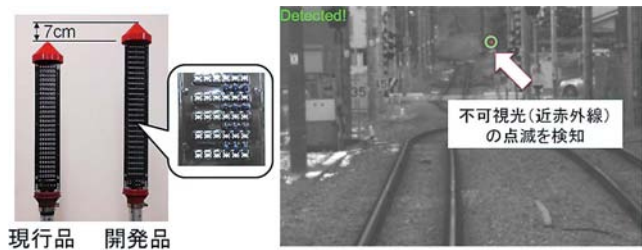


図6 開発した信号機と画像による検知例

図5に示すように不可視光である近赤外線を発光するLEDを埋め込んだ特発(図6)を、列車運転台に搭載したカメラで撮影し、取得した画像データを保守区などで処理し、検査を行うシステムを開発した⁵⁾。

このシステムによって、線区内の特発の検査を、営業列車に支障せず、1回の列車走行で終わることができる。さらに、アナログ的な手法である目視ではなく、デジタル情報に基づいた検査により、その客観性や精度が大幅に向上する。

(2) 転てつ機の状態認知と予測

転てつ機は、機械的な可動部を持つため、他の多くの信号設備のような電子化や、多重化が難しく、メンテナンスに多くの労力を要している。転てつ機の状態を認知する指標の一つに転換負荷力がある。従来から、これを計測する事例はあったが、判定のしきい値が一律であるため、設置環境による個別の「くせ」に対応して、適切に異常の予兆を把握する点で課題があった。

これに対して、得られた状態データを活用することで、状態の変化を早期に把握し、必要な時期に、必要な箇所に点検や調整などのメンテナンス実施を支援する手法を開発した。

転換負荷力のデータを分析したところ、異常がなければ、トングレールのストロークに対して、概ね正規分布することが分った。これを利用して、負荷力が正常時の平均値から大きく外れた場合に、何らかの異常の可能性のあることを警告する(図7)⁶⁾。

これとは別に、データを活用した状態予測によって、計画的なメンテナンスを支援する手法を開発した。

列車通過時の途中転換を防止するためのロック機構

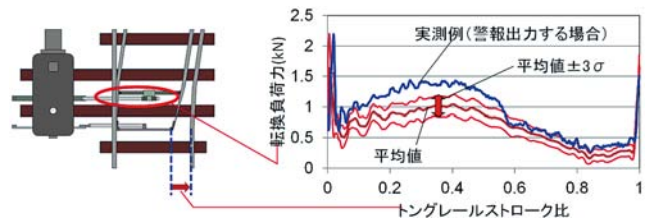
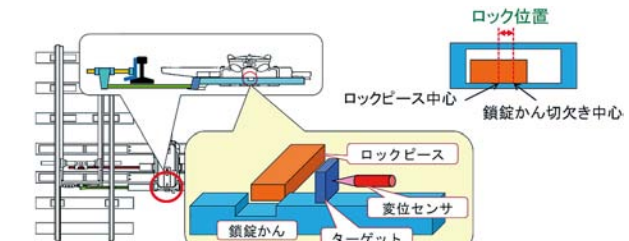
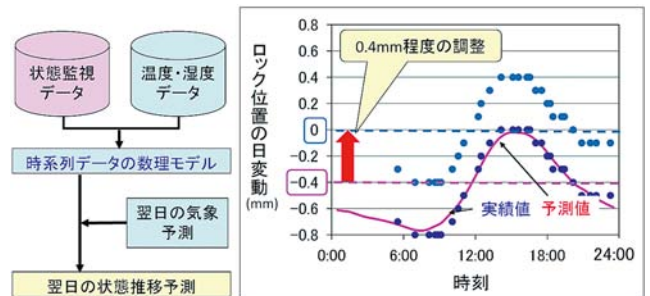


図7 転てつ機の負荷力データ活用例



(a) 転てつ機のロック機構とセンサー



(b) 数理モデルと予測結果

図8 転てつ機の状態(ロック位置)予測

に関して、図8(a)に示すロック位置を適切に保持することが安定輸送確保にとって重要である。しかし、気温などの影響によって変動するため、調整などのメンテナンスの負担が課題となっている。

そこで、ロック位置の実績データと、気温や湿度などの時系列データとの関係を数理モデル化した。これに、気象予測情報を入力とし、翌日のロック位置の変動を予測する手法を開発した⁷⁾。これによって、図8(b)に示すように、ロック位置の平均がゼロとなるようにあらかじめ調整することで、転換不能の予防を図ることができるほか、季節ごとの変動の傾向に応じた計画的なメンテナンスへも活用できる。

(3) 電子化信号設備の予防保全

信号設備の電子化はメンテナンスの軽減、あるいは状態の認知が容易になるなどの効果をもたらしてきた。しかし、電子連動装置などの設備自体のメンテナンス、更新時期を、合理的に評価する考え方が明確でないのが実情である。

現在、電子化信号設備の予防保全手法の確立に向け、電子連動装置を例として、現状把握と寿命の予測手法の開発に着手している⁸⁾。現在、故障などのデータに基づいて部品劣化モデルを構築し、これに基づいて寿

命を予測する手法の開発を進めている。今後、計画的なメンテナンスの考え方や、使用環境に応じた更新時期の判断に資する成果を目指している。

4. メンテナンスを支える情報・ネットワーク技術

4.1 センサーネットワークの適用

2章で述べたように、鉄道では多種、多様な設備が広い範囲に配置される。さらに、保守区などからの距離が遠い場合、あるいは設備の構造上の問題で、作業員のアクセスが困難な場合なども多く存在する。このような条件での、状態認知にはICT、具体的には無線センサーネットワークが有効な手段の一つである。

鉄道メンテナンスへの適用性に関して、図9に示すように、実際の鉄道橋梁を対象とし、鉄道総研内に設けたデータサーバーまで伝送する実験を、約1年間にわたって実施した。その結果、システムの安定稼働、データ到達率も目標である50%を大きく超える80%を達成するなど、良好な結果を得た¹⁾。

また、センサーネットワークの設計に関して、数理最適化技術を適用した、最適設計手法を開発した。上記の橋梁をモデルとした試算では、全ての橋脚に中継装置を設置する場合に比べて、10年間の運用費用を約8%低減できるとの結果を得た(図10)。

なお、本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

4.2 鉄道向けセンサーネットワークの開発

無線センサーネットワークは、設備状態認知の有効な手段であるが、鉄道環境での利用に当っては、以下のような点に対する考慮が必要である。

- センサーが線路に沿って線状に配置される場合が多く、一般的な用途に比べると面的な広がりがないため、センサーや通信経路の冗長化に対する制約が大きい。
- センサーの設置位置が地表に近くなる場合が多く、無線通信の品質確保の上では不利である。

表1に、無線センサーネットワークに適用できる幾つかの技術を示す。それぞれ異なる特徴を有しており、用途に応じて適切なものを選択することが基本になる。しかし、これらの中でWi-SUN (Wireless Smart Utility Network) と呼ばれるものは、通信距離が比較的長く取れる上、干渉や消費電力が少ないため、鉄道向けとして有望な方式と考えている。また、情報通信研究機構が中心となって開発された日本発の方式であるため、鉄道に適した工夫を加えることなどが比較的行きやすい点も利点として挙げられる。

図11には、Wi-SUN通信モジュールを内蔵した加速度センサーを、鉄道総研構内の試験線に敷設した実験の概要を示す。データ伝送の到達率は、97%と良好な結果を得たほか、情報通信研究機構内のM2Mデータセンターを介して、データを可視化する実験を行った。

今後に向けては、通信可能距離を100m程度まで伸

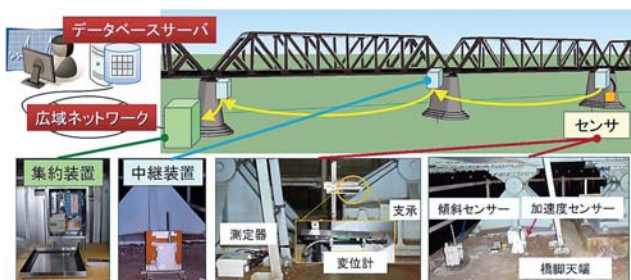


図9 無線センサーネットワークの基礎試験

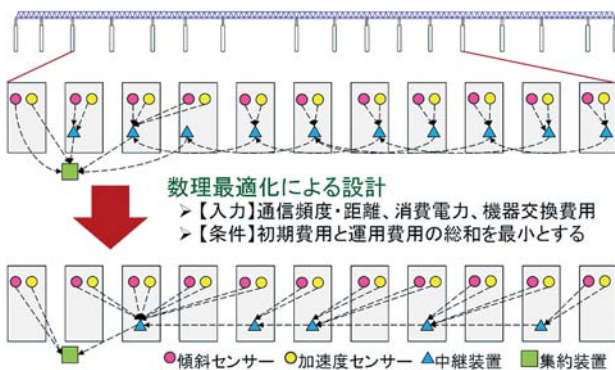


図10 無線センサーネットワークの最適設計

表1 無線センサーネットワークの技術

	Wi-SUN (920MHz)	ZigBee (2.45GHz)	Wi-Fi (2.45GHz)	特定小電力 (420MHz)
見通し内 最大通信距離	700m	100m	300m	1500m
見通し外通信	可能	不利	不利	良好
干渉	少	多	多	少
最大伝送容量	0.4Mbps	0.25Mbps	54Mbps	0.2Mbps
消費電力	数十mW	数十mW	数W	数百mW



図11 無線センサーネットワークの所内試験

ばすこと、マルチホップと呼ばれる多数のノードをわたって通信できる性能を鉄道環境でも向上させる通信プロトコルを開発すること、およびその標準化を目指した研究開発に取り組んでいる。

なお、本研究は、国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究「ソーシャル・ビッグデータ利活用・基盤に関する研究開発」により実施した。

4.3 センサーデータからの状態予測手法

各種センサー得られたデータを、有効に活用する手法も重要である。現在、多数のデータが得られることを前提に、個々のデータの物理的な意味を強く意識することなく、データ間相互の関係性から、異常の予兆を見出す手法の研究に取り組んでいる⁹⁾。

同時刻に得られたデータ間の関係だけでなく、図12に示すような時系列的な関係性を表現するモデルを工夫することで関係性を定義し、これによって早期に予兆を検出することを目指している。図13には、鉄道総研内の試験装置で実施した盛土崩壊を、4.2節で紹介したWi-SUNセンサーで検知する実験データを対象に、この考え方を適用した結果を例として示す。この例では、傾斜角の計測値に大きな変化が現れる数時間前に予兆（データ間の関係性の変化）を捉えられている。

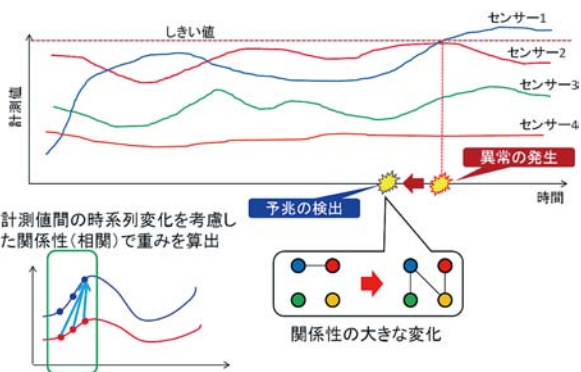


図12 データ間の関係性からの予兆検出

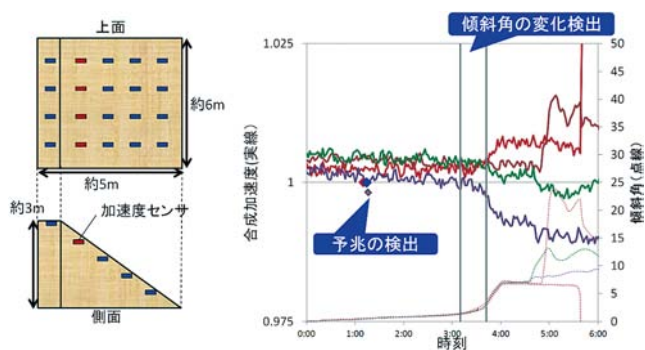


図13 盛土崩壊試験データへの適用例

現時点では、可能性を見出した段階であるが、より早期の段階で適切なメンテナンスの実施を支援する手法の一つとして確立を目指している。

5. 鉄道メンテナンスの革新に向けて

5.1 情報・ネットワークの基盤

鉄道において、高度な状態監視保全を実現するための認知、予測の基盤となる情報・ネットワークの要素技術について、鉄道総研での取り組みを中心に述べてきた。冒頭にも述べたように、将来に向けたこのような仕組みの効率的な構築、さらには多種、多様かつ大規模なデータ分析の効果を得るためには、分野をまたがって設備の状態情報を共有、活用できる仕組みも重要と考える。

これに向けた情報・ネットワーク基盤の一例を図14に示す。この図は、列車運行の制御・管理も含んだトータルシステム¹⁰⁾を示しており、メンテナンスのためのセンサーネットワークなどは、その構成要素である。

このようなシステムが、メンテナンスにもたらすと想定されるものの一例を図15に示す。分野間でのデータ参照が容易になる結果、例えば、土木構造物に設置したセンサーで検知したデータと、軌道状態などの設備状態のみならず、通過列車の詳細なデータとを突き

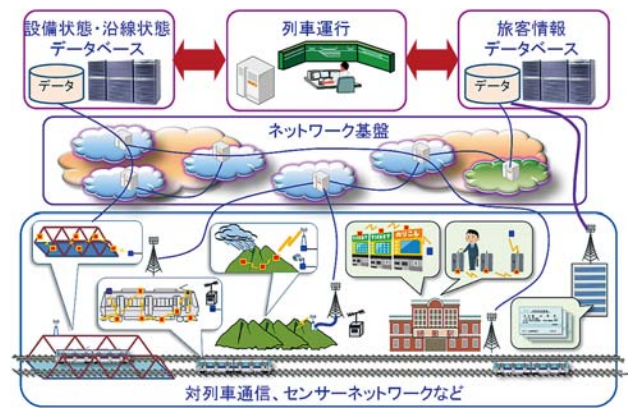


図14 情報・ネットワーク基盤のイメージ

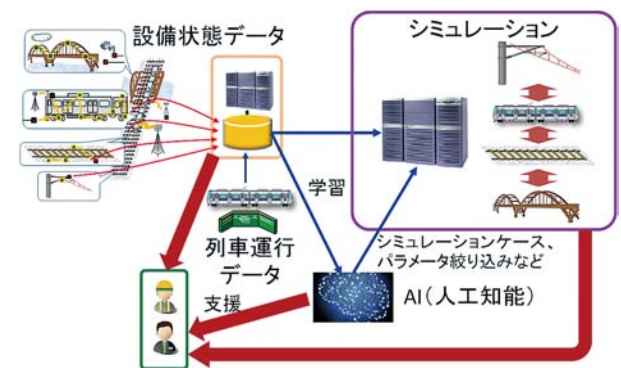


図15 鉄道メンテナンスへの効果

合わせることが容易になる。これによって、何らかの異常が発生した場合の要因の特定、必要なメンテナンスの判断の迅速化などが期待される。また、必要に応じて、構成要素の相互作用の考慮が容易になり、状態予測や、高度なメンテナンスに向けた現象解明のためのシミュレーションの精度向上などが期待される。

また、得られるデータが膨大になることが想定される。これに対しては、人工知能をメンテナンス担当者の判断支援だけでなく、各種データ間の関係分析や、有意なパラメータの抽出の支援などに活用することが考えられる。

5.2 鉄道メンテナンスの将来像

情報・ネットワーク基盤を活用した将来の鉄道メンテナンスのイメージを図16に示す。5.1節で述べたことに加えて、データ化した状態に基づいた定量的、合理的なメンテナンス上の判断や計画作成や、多数の事例の蓄積による、個別のケースに応じた適切な判断、一定の範囲内で専門家が参照できるようにし、アドバイスを得ることなども考えられる。

一方、このようなメンテナンスを実現するためには、規模や細かさの異なる多様な情報を統合して扱うためのデータ伝送制御手法、4章で述べたような鉄道環境に適応した通信技術などが課題として挙げられる。また、無線センサーネットワークの部分を始めとして、サイバーセキュリティの考慮も必要になる。この点については、ネットワークの構築形態にも依存するが、何をどの程度まで考慮すべきかなどについての検討にも併せて取り組んでいく予定である。

6. おわりに

情報技術、ネットワーク技術の活用によって、より高度な状態監視保全が期待できる。特に、従来、アク

セスが困難であった箇所の状態認知、データの共有による要因分析の効率化、シミュレーションや人工知能なども活用した予測の高度化などが期待される。一方で、あらゆる箇所にセンサーを配することは現実的に難しいほか、最終的には人の判断に依るべきものも存在するであろう。したがって、対象とする設備、計測する項目などを十分に理解した上で、その効果を適切に発揮できる用途を見極めることも重要である。

今後も、情報技術、ネットワーク技術の活用を通じて、鉄道の安全性、信頼性、そして利便性の向上に向けた研究開発に取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 野末道子, 羽田明生, 岩澤永照:「無線センサネットワーク技術を活用した橋梁の状態監視システムの開発と運用」, 鉄道と電気技術, Vol.26, No.10, pp.10-14, 2015.10
- 2) (財) 鉄道総合技術研究所:「列車保安制御システムの安全性技術指針」, 1996.3
- 3) 門田芳司:「監視装置の発展と今後の展望」, 鉄道と電気技術, Vol.21, No.21, No.2, pp.7-14, 2010.2
- 4) 吉村誠, 小林和弘, 仲山昭宏, 南澤政明:「鉄道信号システムにおけるメンテナンスフリーについて」, 鉄道と電気技術, Vol.23, No.2, pp.21-27, 2012.2
- 5) 長峯望, 會田学, 中曾根隆太, 鶴飼正人:「特殊信号発光機の視認性確認システムと設置支援手法」, 鉄道総研報告, Vol.30, No.1, pp.17-22, 2016.1
- 6) 押味良和, 潮見俊輔, 五十嵐義信:「転てつ機の転換データを利用した状態判定方法の検討」, 第21回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-RAIL2014), s2-10-5, 2014.12
- 7) 流王智子, 五十嵐義信, 岩澤永照:「電気転てつ機のロック位置変動を予測する」, RRR, Vol.73, No.2, pp.16-19, 2016.2
- 8) 會田学, 藤田浩由, 比澤庸平, 小野雄人:「電子連動装置における電源部劣化に関する考察」, 電気学会リニアドライブ 交通・電気鉄道合同研究会, LD-16-050 TER-16-043, pp.31-36, 2016.7
- 9) 流王智子, 川村智輝, 羽田明生:「データ間の関係性をを用いた類似変化列検出手法」, 電気学会第67回情報システム研究会, IS-16-17, pp.27-32, 2016.8
- 10) 深澤紀子:「鉄道輸送ネットワークにおけるリアルタイムなデータ連携と高度列車運行」, 第28回鉄道総研講演会予稿集, pp.45-52, 2015.11

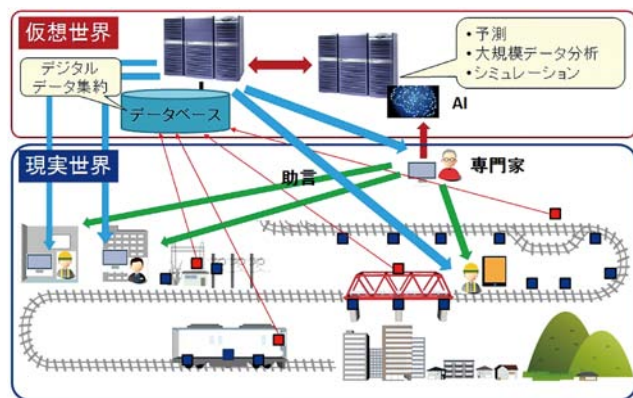


図16 将来の鉄道メンテナンス