

ICTの活用による鉄道メンテナンス技術の革新

公益財団法人鉄道総合技術研究所 研究開発推進部長
久保 俊一



1. はじめに

2016年3月に北海道新幹線が新函館北斗まで開業し、札幌への延伸が進められ、北陸や九州でも工事が進められるなど、新幹線を軸とする鉄道ネットワークの拡大が進められている。新幹線の技術では安全の維持を最優先し、快適性、高速性を可能な限り高め大量輸送を行うことが追求されてきた。

今後も、新幹線、都市内、都市間、地域鉄道の多様なモードで鉄道の価値をさらに高めていくには、今まで同様、各時代の新しい技術を積極的に導入し、鉄道システムの革新に取り組んで行く必要がある。現代の新しい技術はICT(情報通信技術)である。

鉄道システムに新技術に導入し活用するには、システムの構造や機能を見極めた上で、適材適所で導入することが肝要である。現在鉄道メンテナンスでは、従前からの時間計画保全方式から状態監視保全方式への移行の取り組みが進められている。状態監視保全方式では、対象物の状態を正確に認知し、将来の状態を的確に予測して適時適切な措置を施すことが重要であり、ここにICTを導入し有効活用するには、どの技術をどこに導入するかを十分見極める必要がある。

このような状況を踏まえ、今回の鉄道総研講演会のテーマは「持続可能な鉄道を支えるメンテナンス技術－認知と予測－」とした。本稿では、ICT活用による鉄道メンテナンスの革新を目指した鉄道総研のメンテナンス研究開発の現状と今後の方向性について概説する。

2. 鉄道メンテナンスの状況

2.1 鉄道事業におけるメンテナンス

JR各社が発足した1987年度以降の全鉄道事業者の営業経費と職員数、及びそれぞれのメンテナンスに関

わる部分(経費では車両・電路・線路保存費と保守管理費、職員数では本社及び現業の工務・電気・車両・建設)の推移を図1～2に示す。メンテナンス経費はほとんど変化はなく営業経費の約40%を占め、メンテナンスに関わる人員は2005年頃まで漸減しその後は横ばいで割合は約30%である。経費、人員の推移は、各社が安全確保と経費節減に注力する中で達成された結果であることを考えると、安全性・信頼性の確保と向上を前提にさらに効率化を進めるには、鉄道メンテナンスにおいて革新が必要なことを示している。

一方、人口減・高齢化が進む中で、メンテナンス要員の確保と熟練技術者のスキルの維持継承は鉄道事業の持続に不可欠であり、この点からも鉄道メンテナンスの革新が必要である。

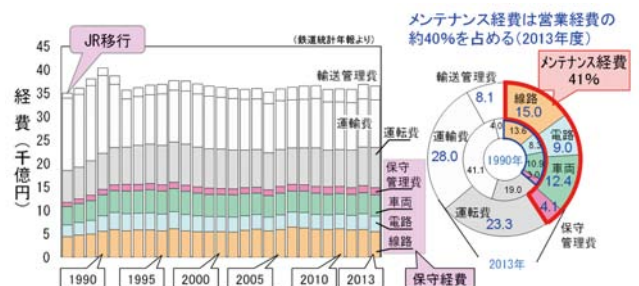


図1 営業経費とメンテナンス経費の推移(円グラフは1990、2013年度)¹⁾

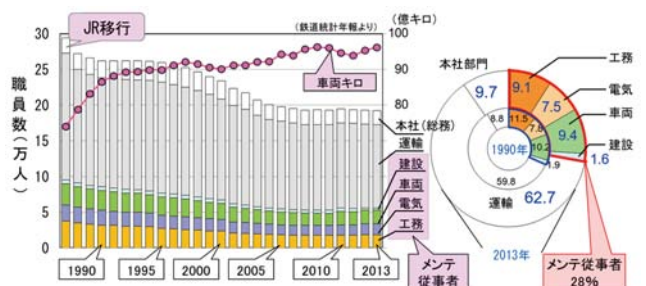


図2 職員数とメンテナンス従事者数、車両キロの推移(円グラフは1990、2013年度)¹⁾

2.2 鉄道メンテナンスの特徴と課題

特徴は大きく分けて次の3点である。

- ① 構造物、軌道、車両、電気等、複数の技術分野から成り、分野ごとに方法が異なり、技術分野の境界で問題が生じうる。
- ② 地上設備は屋外設置で、自然環境の影響を受け、線路や電車線路は長大で、全線での常時監視は難しく、周期を定めた定期検査が行われる。
- ③ 設備（線路）と移動体（車両）を一元的に管理し、固定設備のメンテナンスの義務があるが、自らの判断で全体を最適化できる。

課題は、全面的な取り替えが難しい構造物と、構造物以外の取り替え可能な設備とで異なる（図3）。前者は、橋りょう、高架橋、トンネル、盛土等、建設時からの設備は老朽化が進んでおり延命化が課題である。後者は、車両、軌道、電力、信号・通信等の設備で、使用・時間経過に伴い劣化が進行し、検査で性能維持が困難と判断されると補修され、補修周期の延伸が課題である。

2.3 鉄道メンテナンスの方法

設備や機械の性能維持のためのメンテナンス方式は、JIS Z 8115「ディペンダビリティ」²⁾では図4のように分類される。表1は時間計画保全と状態監視保全での利点・欠点である。

(1) 予防保全 (Preventive Maintenance)

設備等の使用中の故障発生を未然に防止するため、規定の間隔・基準に従って行い、設備等の機能劣化・

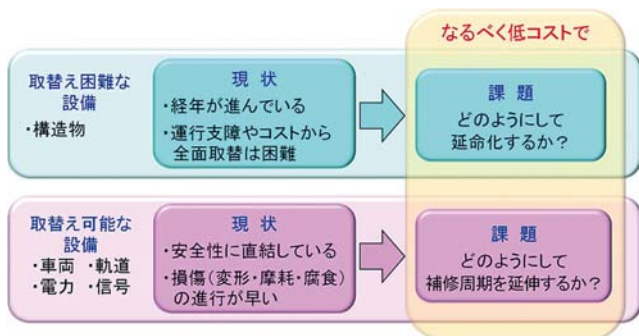


図3 鉄道メンテナンスの設備タイプ別課題

故障の確率を低減するため、設備等を使用及び運用可能状態に維持し、または故障、欠点などを回復するための措置（取替、調整、修理等）を行う。予防保全には、時間計画保全と状態監視保全がある。

(2) 時間計画保全 (TBM : Time Based Maintenance)

一定時間（走行距離、負荷回数）ごとに補修する。補修計画が容易、劣化の判断が困難でも適用可能であるが、負荷・環境変化に対応できない（リスク増）、寿命を残しての交換はコスト増となる等が欠点である。

(3) 状態監視保全 (CBM : Condition Based Maintenance)

対象物の動作確認、劣化検出、経過の記録・追跡等を目的に、設備の状態を連続的、間接的または定期的に監視し、それに基づいて損傷に至る前に措置する。負荷や環境変化への対応が容易、寿命近くまで使用できコスト削減が可能であるが、監視のためのコストやデータ分析・評価が必要などが欠点である。

状態監視保全のフローを図5に示す。設備の劣化特性に応じある時期に検査を実施し、所要の性能や状態が維持されているか評価し、結果に応じて措置を取る。

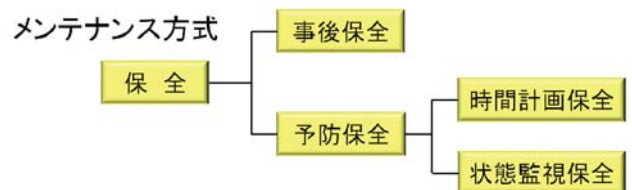


図4 メンテナンス方式

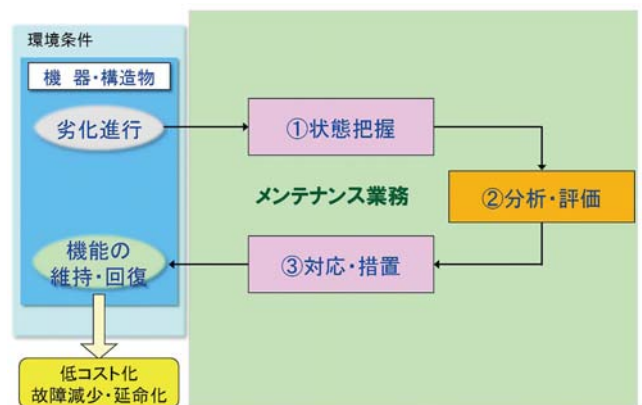


図5 状態監視保全のフロー

表1 メンテナンス方式の利点と欠点

項目	時間計画保全 TBM (Time Based Maintenance)	状態監視保全 CBM (Condition Based Maintenance)
手法	・一定時間（走行距離、負荷回数）ごとに補修する	・状態を監視していて損傷に至る前に補修する
利点	・補修計画が容易である ・劣化の判断が困難な場合でも適用できる	・負荷・環境変化に対応しやすい（リスク対応） ・寿命近くまで使用できコストが削減できる
欠点	・負荷・環境変化に対応できない（リスク増） ・寿命を残して交換など、コスト増となる	・監視のためのコストがかかる ・データ蓄積が必要である

- ①状態把握：設備等の使用中のある時点での動作値及びその傾向を連続的、間接的または定期的に検査・試験・計測等の手段または装置により監視し状態を把握する。
- ②分析・評価：状態把握の結果から設備等の使用中の動作状態の確認、劣化傾向の検出、故障及び欠点の確認を行い、取替え、調整、修理等の要否を判断する。
- ③対応・措置：分析・評価の結果から必要な対応や措置を取る。

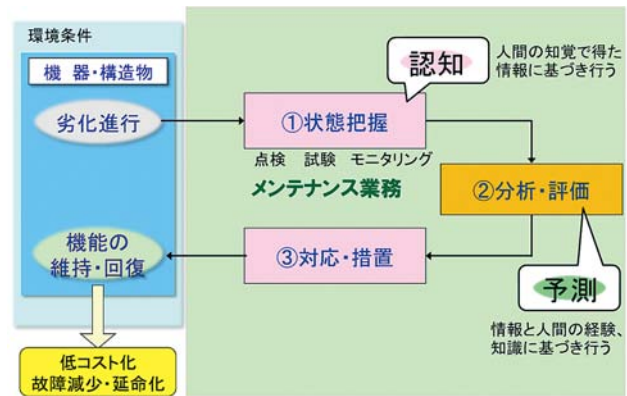


図7 状態監視保全における認知と予測

2.4 状態監視保全の高度化

鉄道総研は、2013年の第26回鉄道総研講演会³⁾において、これからのメンテナンスを考えるに当たって研究開発の目標を「所要の性能を低コストで維持するためのメンテナンス手法の開発」とし、これを実現するための重点実施事項として、

- ①劣化メカニズムの解明
- ②状態監視保全の高度化
- ③補修方法の低コスト化

の3項目を提案した(図6)。

本稿では、上記3項目のうち「②状態監視保全の高度化」を取り上げ、状態監視保全に近年進展の著しいICTを活用することで高度化を図ることについて、状態監視保全へのICTの導入・活用方法、導入にあたっての課題、及びICT活用による効果について述べる。

3. 状態監視保全における認知と予測

3.1 認知と予測

状態基準保全のフローの「①状態把握」では、検査(目視観察、打音や臭いの感知、ノギスから専用測定器までの機器を用いた計測まで様々な方法)や装置による監視結果に関する情報を、人間が目・耳・鼻・皮膚などの感覚器官を通して直接取得し(知覚)、それを理解し知識や経験に基づき設備の状態や劣化傾向を判断

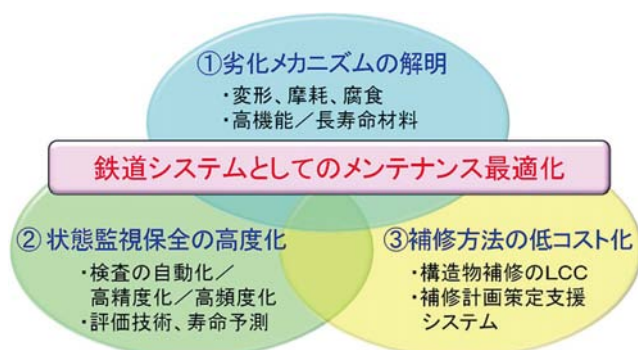


図6 メンテナンス研究開発の重点実施事項

する。この過程を「認知」とする(図7)。

次いで、「②分析・評価」は、検査により認知した設備の状態や劣化傾向に基づき、経験や知識を総動員して将来の設備の劣化状態を予測し、対応や措置の要否を判断する。この過程を「予測」とする(図7)。

状態基準保全とは、設備の現在の状態を「認知」し、それに基づいて将来の状態を「予測」し対応を決める方式であり、故障の発生率等で示される保全の品質は、正確な認知、的確な予測、それを受けた適時適切な対応・措置にかかっているとと言える。鉄道メンテナンスにおいて状態監視保全方式に移行し、メンテナンス経費と設備等が原因の輸送障害を減らしていくには、認知と予測の精度を高めるとともに有効な措置の研究開発も必要である。

3.2 状態監視保全へのICTの導入

鉄道メンテナンスにICTを導入し活用するにあたっては、鉄道メンテナンスに関わる全ての事象がデジタル化されていることが条件である。

ICTには次のような技術がある。

- ・センシング技術、モニタリング技術
- ・IoT/M2M/センサーネットワーク
- ・シミュレーション
- ・画像処理(イメージング)
- ・人工知能(AI)
- ・ビッグデータ解析

これらを状態監視保全の基本的な要素の認知と予測で活用すると図8の関係となる。認知では、状況を知覚する過程にはセンシング技術、モニタリング技術、IoT/M2M/センサーネットワーク、それを人間が判断できるようにする過程には画像処理(イメージング)、判断の過程には人工知能(AI)が活用できる。

また、予測では、シミュレーション、ビッグデータ

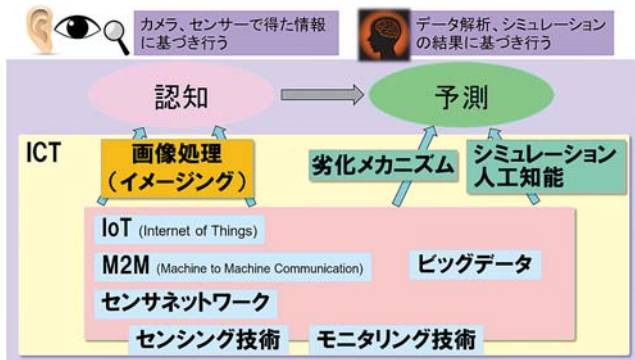


図8 認知と予測へのICTの活用

解析、人工知能 (AI) が活用できる。

認知と予測を受けて対応・措置を選択する過程では、ビッグデータ解析や人工知能 (AI) が活用できる。

一方、これらの過程で技術的な拠り所となる設備の劣化メカニズムなどの理論・知識についても、デジタル化された状態で提供されるならばICTと同様に活用できる。

3.3 認知と予測へのICT活用

(1) 認知への活用

認知では知覚と判断の過程にICTを活用する。人間の知覚の代わりにカメラやセンサーを使い、これらをセンサーネットワークやM2M等でネットワークに接続してデータを共有する。人間の知覚能力を超えた質、量の情報を、現場から離れた場所で即時、高頻度、高精度、連続的に取得し蓄積できる。人間は画像処理で可視化された対象物の劣化情報を見て、対象物の劣化状態や損傷の兆候を把握することができる。

人間の能力を超える性能のカメラやセンサーで得た大量の高頻度、高精度データを画像処理で可視化することで、人間の知覚だけに頼らず定量化された情報による認知が可能となり、対象物の状態把握を定量的にできる。

ただし活用の際は、対象物に適した精度や信頼性のカメラ、センサーの選択、迅速な画像処理に加え、ネットワークのセキュリティの考慮が必要である。

(2) 予測への活用

予測では、認知した情報を基に人間が経験や知識を総動員して予測する代わりに、カメラやセンサーで取得し蓄積したデータの解析や、データを用いたシミュレーションにより予測する。大量のデータ解析では人工知能 (AI) の援用も必要である。人間は可視化された対象物の劣化予測を見て、対象物の劣化進行や余寿

命を知ることができる。人間の経験や知識だけに頼らず、対象物の劣化進行や余寿命、損傷の可能性を定量的に把握し評価できる。

ただし活用の際は、大量の取得データの処理・解析、対象物の劣化メカニズムの理解に基づいたシミュレーションモデルの構築が必要である。

(3) 対応・措置への活用

ICTを活用した認知と予測による対象物の劣化状態の把握、劣化進行や余寿命の評価ができた段階で、対象物への何らかの対応や措置の要否の判断、対応・措置を行う場合にはその方法の選択と措置の計画を策定しなければならない。措置方法の選択や措置計画の策定は、あらかじめ用意された様々な補修手段・方法の中から、補修を行う現場のリソースも考慮し、対象物の劣化状態、劣化進行と余寿命に応じた適時適切な解を探し出す過程であり、従前は熟練技術者の経験と知識を頼りにしてきたものである。

この過程では、人工知能 (AI) を適時適切で効率的な補修方法の探索と補修計画の策定に活用することが期待される。さらには、適時適切な対策提案にとどまらず、対象物のLCC (ライフサイクルコスト) も考慮した補修計画全体の策定に活用することが期待される。

3.4 ICTを活用した状態監視保全の姿

状態監視保全における認知と予測及び対応・措置にICTを活用すると鉄道メンテナンスの状態監視保全のフローは図9のようになると考えられる。

今までは人間の知覚に頼っていた対象物の劣化状態の把握の過程 (認知)、人間の経験や知識に頼っていた対象物の劣化進行の分析や評価の過程 (予測)、さらに対象物への補修の要否、補修手段・方法の選択と補修計画の策定の過程 (対応・措置) が、定量化され高度化されると期待できる。

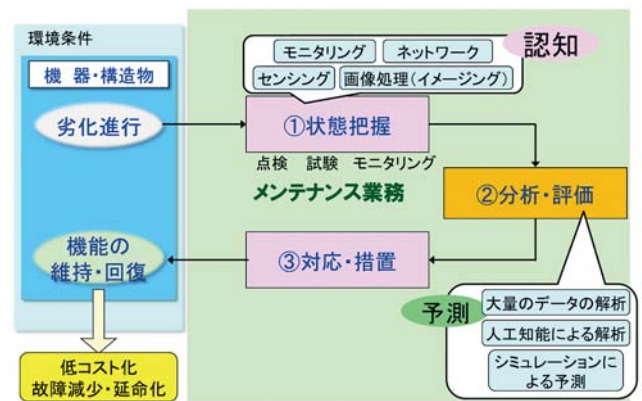


図9 ICTを活用した状態監視保全

一方、ICT活用でのメリットは、状態監視保全のそれぞれの過程の定量化だけにとどまらない。各過程は互いにネットワークに接続され情報が共有される。鉄道メンテナンスでは、認知では現場の検査員が、予測では現場の検査員や保守区所の技術者が、対応・措置では保守区所の技術者と統括する本社・支社の技術者が、それぞれ主に携わり情報を管理している。ICT活用とネットワーク化によりメンテナンスに関わる様々な情報は、現場の検査員から保守区所の技術者、本社支社の技術者まで、全ての関係者間でネットワーク上で共有され、より正確で迅速な意思決定が期待される。

ネットワーク化はさらに鉄道メンテナンスでの特徴である複数の技術分野間での情報共有にも及ぶ。

これまで鉄道の現場では、軌道管理データや施設管理データ、車両管理データ等を集集し、それぞれ個別に記録として残しメンテナンスに使用してきた(図10(a))。ICT活用とネットワーク化によって、今まで個別の技術分野ごとに収集、分析、評価が行われてきたメンテナンス情報が各技術分野で共有され、複数の技術分野をまたいで集約・整理され、比較や相関などの分析が可能となる(図10(b))。

このような複数分野をまたいだ分析により、今まで認知されてきた劣化現象について、新たな因果関係が

認められたり、新たな判断材料が生まれ、技術分野の境界での問題の解決、設備の劣化メカニズムの解明や保守作業の効率化に活かせる可能性がある。

4. メンテナンスへのICT活用の研究開発

鉄道総研は2015年から5年間の「基本計画 RESEARCH2020」において、鉄道の将来に向けた研究開発の課題として「情報ネットワークによる鉄道システムの革新」を設定し、情報ネットワーク・ICTの活用などにより、列車運行の利便性を高め、メンテナンスコストを低減し、省エネルギーな鉄道システムを構築する研究開発に取り組んでいる。

ここでは、鉄道総研における鉄道メンテナンスへのICT活用の取り組みの一端、及び、各技術分野での状態監視保全の認知及び予測の過程に対応する研究開発を紹介する。

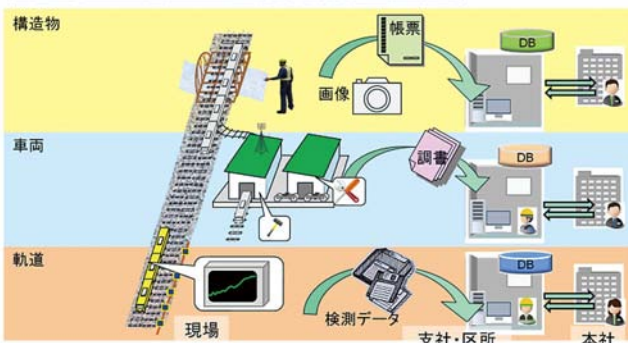
4.1 メンテナンスへのICT活用の研究開発

鉄道メンテナンスにICTを活用して状態監視や検査の機械化により保守の効率化、新たな検査体系の構築、低コスト化の実現を目的に構造物、軌道、集電、車両の各分野で取り組んでいる。

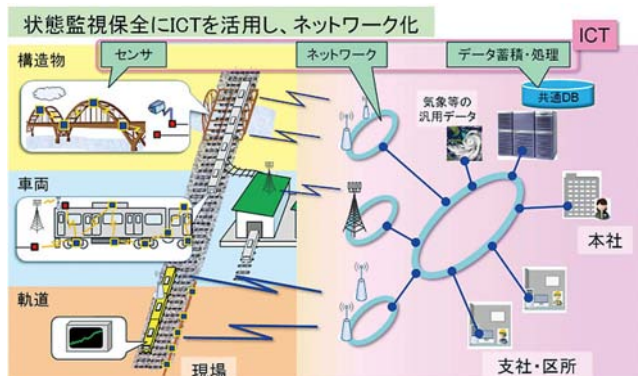
構造物では、画像技術を活用した構造物の検査手法の提案、変状予測手法の提案、構造物の健全度の可視化技術の開発、維持管理支援ツールの開発を行う。新たな維持管理体系を提案することで、将来的に維持管理に要するコストの20%削減を目指す(図11)。

集電系では、画像技術による電車線路の状態監視や電車線設備に適用できるリスクも踏まえたコスト評価手法を開発し、線区に応じた低コスト電車線の提案や、保全作業支援手法の開発を行い、LCCの10%削減を目指す(図11)。

分野ごとにメンテナンスの課題と必要な情報が多様



(a)現在の鉄道メンテナンス



(b)状態監視保全にICT活用・ネットワーク化

図10 鉄道メンテナンスのイメージ

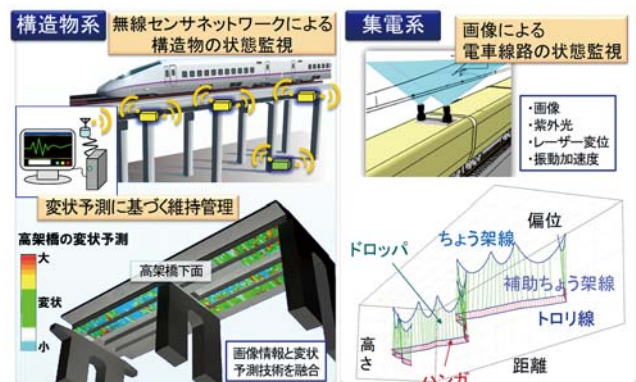


図11 構造物系、集電系でのICT活用の研究開発

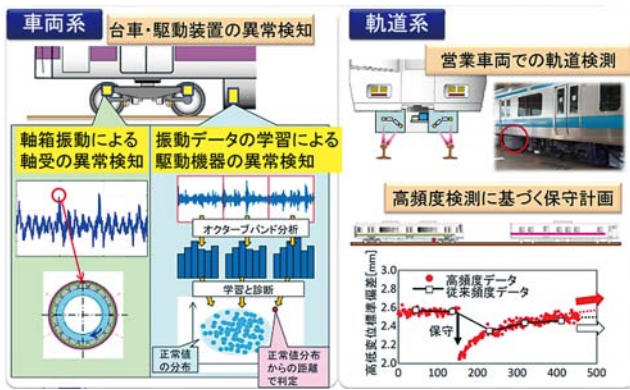


図12 車両系、軌道系でのICT活用の研究開発

車両系では、ICTを活用した台車状態監視システムを開発し、早期異常検知により損傷拡大の防止による修繕コスト低減、車軸軸受の損傷による運行支障の根絶を目指す(図12)。

軌道系では、レール摩耗や内部傷等の状態を高頻度かつ効率的に検査する装置を開発する。また、軌道検測車で得られる膨大なデータを統計的に処理し、目的に応じて軌道状態を診断するシステムを開発する。診断結果に基づいてLCCやリスクを最小とする軌道保守計画・軌道更新計画を出力するシステムを開発し、保守コスト・要員の10%削減を目指す(図12)。

4.2 状態監視保全での認知と予測に関わる研究開発

(1) 構造物

長大鋼橋を対象として、支承変位、橋脚の傾斜角や固有振動数等の健全度の判断に有用なデータを取得する橋りょうモニタリングシステムを開発している⁴⁾。本開発の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

山岳トンネルの覆工コンクリートのひび割れ等の監視方法として、無線センサーを用いたトンネル状態監視システムを開発した⁵⁾。

土留め壁の健全度の定量的評価法として、健全度と振動特性に相関性があることから、土留め壁に対する応答振動のスペクトル面積の大きさで健全度を評価する方法を提案した。

コンクリート構造物の劣化のうち鉄筋腐食に関して、塩害や中性化による鉄筋腐食の開始時期、腐食ひび割れの発生時期をある程度推定できる実用的な劣化予測モデルが提案されている⁶⁾。

変状の生じた山岳トンネルについて、地山の劣化モ

デルを提案し、FEM解析による変位や変状の予測法を提案している⁷⁾。

(2) 軌道

鉄道総研が開発した「慣性正矢軌道検測装置」⁸⁾は、営業車で検測車と同等の軌道変位が測定でき、従来は3か月に1回程度だった軌道検測を高頻度に行える。

高頻度なデータを用いた軌道変位の将来予測の精度向上と迅速な保守計画の策定のため、高頻度検測に対応した軌道保守計画システムを開発した⁹⁾。将来の軌道変位を確率分布として予測し、逐次追加されるデータに基づき予測精度を向上させる機能を有し、単純な回帰予測よりも予測誤差を40%低減できる。

列車による繰返し荷重条件下のバラストの弾塑性変形を客観的な条件だけで再現できるシミュレーションモデルを開発した¹⁰⁾。徐々に進展するバラストのひずみ増加を再現でき、様々な軌道構造や材料条件でのバラスト軌道の沈下を予測できる。

(3) 車両

エンジンや主電動機軸受の振動測定による異常判別は、走行速度や軌道条件で振動が変動し困難であったが、振動波形をオクターブバンド分析し、過去のデータと比較することで異常判断する手法を開発した¹¹⁾。

パンタグラフすり板に段付摩耗が生じると、すり板や舟体が割損し電車線設備の重大な損傷を引き起こす恐れがある。段付摩耗が発生した状態で車両が走行したときのトロリ線支持部に生じるまくらぎ方向の引張力をセンサーで監視し、引張力の波形から段付摩耗の有無を判断するアルゴリズムを開発した¹²⁾。

インバータ装置に使われるパワー半導体は、電気的特性による劣化評価が行われてきたものの、新品と経年品でほとんど差は見られなかった。パワー半導体の熱特性の一種の熱抵抗を精度よく測定することで劣化を捉えられ劣化予測が可能となることがわかった¹³⁾。

(4) 電車線設備

電車線路は長大で設備点数が多く、劣化要因も様々で劣化箇所も限定しにくいいため、シミュレーションと画像計測を組み合わせた非接触の状態監視を目指した研究開発を進めている。

画像による電車線路の状態計測として、レーザー測域センサーによる電線の位置特定と、ラインカメラのステレオ画像からの電線位置計測を組合わせた方式に取り組んでいる¹⁴⁾。ちょう架線やハンガ位置が計測できる。

劣化予測のツールとして、画像で計測した電車線の架設状態を入力とし、速度やパンタグラフの条件を与

え、接触力や電車線各部の振動・応力の動的挙動を予測する運動シミュレーションを提案している¹⁵⁾。

運動シミュレーションによる接触力と集電電流及び最近の通電接点の摩耗現象の知見から¹⁶⁾、トロリ線の摩耗進行を予測できると考えている。断線事故の危険性の減少、局部摩耗の解消が期待される。また、運動シミュレーションと架線金具の振動解析の組み合わせでは、振動疲労による劣化予測が可能である¹⁷⁾。

(5) 信号設備

信号設備は以前から状態監視が行われ、電子化された設備が導入され、メンテナンス作業自体を軽減できる技術¹⁸⁾も実現しているが課題もある。

信号設備は、常時動作の上で状態監視を行うが、踏切支障を運転士に知らせる特殊信号発光機のように常時動作していないため定期点検が必要な機器もある。

転てつ機は、機械的な可動部を持ち電子化や多重化が難しい設備であるが、転換時の負荷力の測定により状態認知ができる。負荷力の分析結果から、異常がなければトングレールのストロークに対する負荷力は概ね正規分布することがわかり、負荷力の測定値から異常を警告するシステムを開発した¹⁹⁾。

電子連動装置は、設備自体の更新時期を合理的に評価する考え方が明確ではない。電子連動装置の故障等のデータに基づき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に取り組んでいる²⁰⁾。

5. おわりに

近年、鉄道メンテナンスは、予防保全の一種で一定時間ごとに補修する時間計画保全から、低コスト化と故障減少、延命化が可能となる方式で、状態を監視し損傷に至る前に補修する状態監視保全に移行しつつある。一方で近年のデジタル化とICT（情報通信技術）の進展は著しく、ICTの導入と活用による状態監視保全の高度化と、それによる鉄道メンテナンスの革新が期待される。

状態監視保全にICTを導入し活用するために、状態監視保全のフローを「認知」、「予測」と「対応・措置」の過程に分け、ICTの種々の技術のうち各過程に導入する技術を挙げ、導入・活用法を示した。さらに導入での課題及び活用の効果について示し、ICT活用とネットワーク化による鉄道メンテナンスの新たな姿を提案した。

鉄道総研では、鉄道事業者が実施するメンテナンスにおいて、一層の安全性・安定性・利便性の維持向上

を図りつつ、トータルメンテナンスの最適化を実現するために、ICT活用による状態監視保全の高度化の研究開発に取り組む。

鉄道システムが利用者から信頼され、期待される輸送サービスを持続し続けるには、適切なメンテナンスが不可欠である。鉄道総研は所要の性能を低コストで維持するための手法の開発を目標に、メンテナンスに関する研究開発を積極的に進める。そのためには鉄道事業者はもとより、行政・学協会・産業界との連携が重要であり、今後ともご理解ご協力をお願いしたい。

参考文献

- 1) 国土交通省鉄道局、他：鉄道統計年報，昭和62年度～平成25年度
- 2) 日本工業規格：JIS Z 8115：2000「デイペンダビリティ（信頼性）用語」
- 3) 高井秀之：経年劣化の評価と克服に向けたメンテナンス技術，第26回鉄道総研講演会要旨集，2013.11
- 4) 名取努，阿部慶太，小湊祐輝，関口琢己，諸橋由治：模型実験および実フィールド計測による鉄道橋梁橋脚の状態監視手法に用いる健全度診断指標の適用性検討，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.19，pp.37-44，2015
- 5) 津野究，蒲地秀矢，中西祐介，仲山貴司：無線センサを活用したトンネル変状監視システムの開発，トンネル工学報告集，Vol.19，pp.245-249，2009
- 6) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（コンクリート構造物），2007.1
- 7) 野城一栄，嶋本敬介，小島芳之，朝倉俊弘：時間依存型地山劣化モデルによるトンネルの変状予測法の開発，鉄道総研報告，Vol.22，No.10，pp.53-58，2008
- 8) 坪川洋友，矢澤英治，小木曾清高，南木聡明：車体装架型慣性正矢軌道検測装置の開発，鉄道総研報告，Vol.26，No.2，pp.7-12，2012
- 9) 佐野弘典，三和雅史，山口剛志，吉田尚史，矢坂健太，坂口和弘：高頻度軌道検測データの軌道状態診断および保守計画策定への活用方法，鉄道総研報告，Vol.29，No.8，pp.47-52，2015
- 10) 岡安崇史，村本勝己，中村貴久：弾性限界面を考慮した下負荷面モデルによるバラストの繰返し負荷挙動の予測，第49回地盤工学研究発表会，pp.1025-1026，2014

- 11) 近藤稔, 真鍋慎一, 高重達郎, 菅野普: 振動のオクターブバンド分析を用いた車両用ディーゼル機関の異常検知手法, 鉄道総研報告, Vol.29, No.9, pp.17-22, 2015
- 12) 小山達弥, 白田隆之, 川崎邦弘, 中村一城, 川村智輝: 電車線に設置したセンサ群によるパンタグラフ異常検知手法, 鉄道総研報告, Vol.29, No.12, pp.35-40, 2015
- 13) 福田典子: 高耐圧・大電流パワー半導体モジュールの総合的な劣化評価, 鉄道総研報告, Vol.27, No.12, pp.41-46, 2013
- 14) 根津一嘉, 松村周, 網干光雄, 庭川誠, 川畑匠朗, 田林精二: ステレオ画像計測とレーザー測距を併用した架線の非接触位置測定手法, 鉄道総研報告, Vol.28, No.10, pp.29-34, 2014
- 15) 網干光雄: 動特性計算による架空電車線凹凸の評価法, 電気学会論文誌D(産業応用部門誌), Vol.126, No.7, pp.983-988, 2006
- 16) 山下主税: 電気鉄道における集電材料の通電摩耗機構に関する研究, 東北大学博士学位論文, 2015
- 17) 山下主税, 小原拓也, 松村周: 有限要素法を用いた電車線コネクタの疲労寿命推定手法, 鉄道総研報告, Vol.28, No.10, pp.23-28, 2014
- 18) 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
- 19) 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
- 20) 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