

持続可能な安全を実現するメンテナンスの高度化

軌道技術研究部長
村本 勝己



1. はじめに

鉄道システムのメンテナンスは、車両、軌道、電力・信号、構造物といった各技術分野ごとに、故障や事故等の様々な課題を解決しながら経験を積上げて進化してきた経緯がある。結果として、鉄道の事故や故障は減少傾向にあるものの、技術者がそれらに遭遇する機会も当然減ることになる。したがって、少子高齢化とも相まって、経験豊富なメンテナンス技術者の不足は、本質的に解決が困難な問題である。

この解決困難な問題に対する解答として、ICTに対する期待は大きい。しかし、メンテナンスは鉄道の品質を保証する基盤であり、人が命を預けるほどの信頼を獲得することは簡単ではない。「経験豊富な技術者と同じことができる」という程度ではなく、「人間には不可能な新たな価値」を提示できて初めて、信頼を検討するに値する段階に達したといえる。

本稿では「鉄道の安全・安心を創る」という今回の

鉄道総研講演会のメインテーマを踏まえ、末永く安心して鉄道を利用できる「持続可能な安全」を実現するために、ICTを活用した鉄道メンテナンスの高度化について、その進むべき方向と鉄道総研の取組みについて概説する。

2. メンテナンスの高度化

2.1 鉄道メンテナンスの現状

鉄道システムを構成する各分野ごとの近年のメンテナンスの課題を分類すると概ね図1のようになる。各分野ごとに、寿命・耐用期間が短い構成要素については、「検査・補修周期延伸」が主な課題となり、寿命・耐用期間の長いものは「老朽化対策」が主な課題となってきている。また、前述したように経験豊富な技術者や労働力不足が顕在化し始めたこともあり、「省力化」は各分野共通の課題となっている。図2に、1990年度からの鉄道の運送費の推移¹⁾を示すが、総運送費の約



図1 鉄道システムのメンテナンス

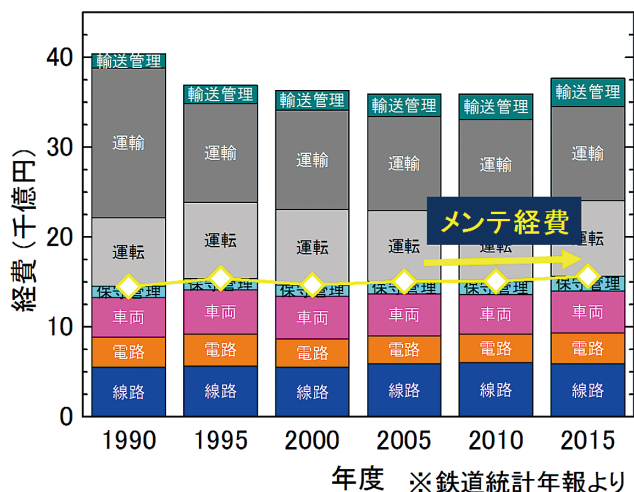


図2 メンテナンス経費の推移

4割を占めるメンテナンスコストは、総量、内訳共に20年以上大きな変動はなく、横ばい状態にある。すなわち、日本の鉄道における安全性とメンテナンスコストのバランス点はほとんど変動していないと推察され、さらなるコスト低減には抜本的なブレークスルーが必要であると考えられる。

2.2 メンテナンス体系の概要

メンテナンスには、設備機器が故障してから対応する事後保全と、故障前に対応して故障を未然に防ぐ予防保全に大別される。高い安全性が要求される鉄道においては、主要な構成要素に対しては予防保全の考え方が基本である。予防保全は、さらに、以下の2つに分類される。

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

一定の時間、走行距離、使用回数ごとに検査・補修を行う保全方法である。劣化・破壊の予測ができなくても適用可能であるが、想定外の負荷や環境変化に対しては対応が困難。

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

メンテナンス対象物の状態を監視し、故障に至る前に補修や交換等の措置を行う。高頻度に監視を行うことによって想定外の負荷や環境変化にも対応が可能。

近年は、センシング技術の性能向上とコスト低減によって、様々な業界でCBMの導入が進んでいる。その当面の目標は、異常の認知・予測・判断の自動化にあるが、そのためには、安全と危険の合理的な判断基準が必要となる。

2.3 安全と危険の判断基準

図3に、一般的な決定論的判断基準の概念を示す。



図3 決定論的判断基準

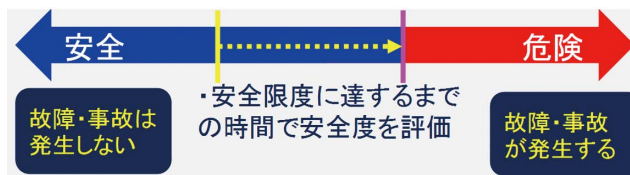


図4 予測を踏まえた決定論的判断基準

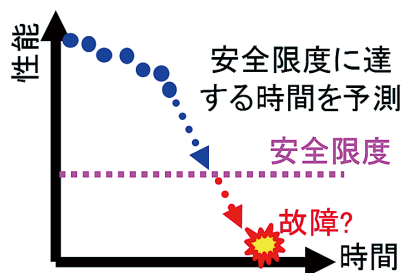


図5 性能低下推移の予測

これは、何らかの条件や仮定の下に安全限度等のしきい値（要求性能とする場合もある）を設定し、この安全限度をもって安全・危険を判断するものである。実際の運用では、この安全限度の手前に、補修期間や安全率を考慮した管理値や整備目標値等といった値を設定してこれを実質的なしきい値とすることが多い。決定論的な判断基準は、安全と危険の境界が明確なのでわかりやすく、基準やマニュアルを設定しやすいという利点があるものの、設定した条件に見落としや不備があると想定外の危険にさらされる可能性がある。そのため、安全限度は厳しくなりがちでメンテナンスコストの削減が難しく、結果として設備の維持が困難になる事態もあり得る。

そこで、CBMを踏まえて、判断基準に予測の概念を加えると図4のような判断基準を設定することができる。これは、性能低下が安全限度に達するまでの時間を予測し（図5）、その時間をもって安全度を評価しようというものである。予測の精度を高めれば安全限度を緩和することも可能であり、安全度に基づいて補修計画の策定を自動化することも可能となる。基本的な概念は従来の判断基準をベースとしており、基準やマニュアルを大きく変更する必要もないことから、当面、鉄道におけるCBMは、この予測の概念を加えた判断基準を基本に普及していくものと考えられる。

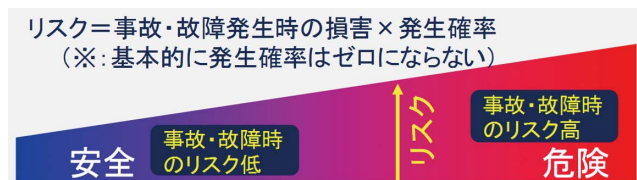


図6 リスク概念に基づく判断基準

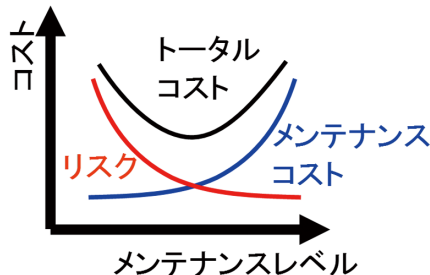


図7 リスクベースメンテナンスの考え方

さらに、安全と危険を明確なしきい値で決定論的に区分するのではなく、連続的にリスクの大ききで評価する判断基準の概念が図6である。リスクの表現にはコストと直接対比できるように、

リスク＝事故・故障発生時の損害額×発生確率

として、金銭に換算するのが一般的である。欧米や保険業界では特に新しい概念でもないが、東日本大震災の原発事故以降、リスクの見える化・定量化の必要性は社会一般にも浸透しつつあることを踏まえ、鉄道総研でも検討を進めている。メンテナンスへの適用にあたっては、図7のように、メンテナンスコストとリスクを総和したトータルコストで検査・補修の優先度を定量化する、リスクベースメンテナンス (RBM: Risk Based Maintenance) の考え方が基本となる。これは、限られたメンテナンスコストを有効活用して持続可能

な安全を実現するために有効な概念であるが、適用にあたっては定量的なリスクアセスメントや基準・マニュアルの変更も必要となる。鉄道においては、当面は局所的に高リスクが想定される箇所限定して試用・検討を進めていくことになると思う。

2.4 持続可能な安全に向けたメンテナンスの高度化

「持続可能な安全」を実現するための鉄道メンテナンスには、

- (1) 社会が安心して鉄道を利用するための「安全性の向上 (=リスクの低減)」
- (2) 鉄道事業者が鉄道を維持し続けていくための「メンテナンスコストの低減」

が必要である。その解決策として有効と考えられるのがICTによるメンテナンスの高度化であり、RBMの概念に基づいて、メンテナンスレベルとコストの関係で説明すると図8のようになる。すなわち、ICTを活用してメンテナンスを高度化し、省力化・低コスト化を達成できれば、メンテナンスレベルを引き上げてリスクを低減しつつ、トータルコストも下げる事が可能になると考えられる。

3. メンテナンスを高度化する鉄道総研の取組み

3.1 メンテナンスへのICT活用

メンテナンスを高度化するためのICT活用には、図9に示すように、【認知】【予測】【判断】【実行】の4つのフェーズが考えられる。さらに、これらのフェーズ

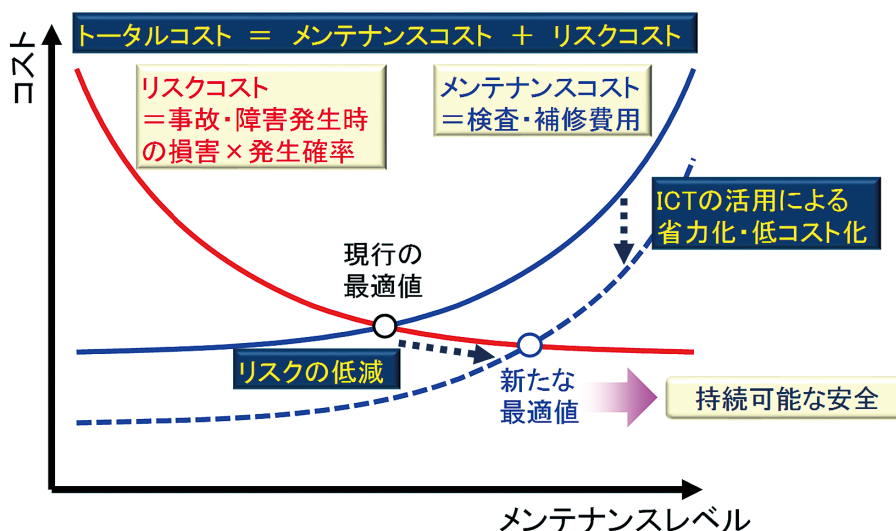


図8 持続可能な安全に向けたメンテナンスの高度化

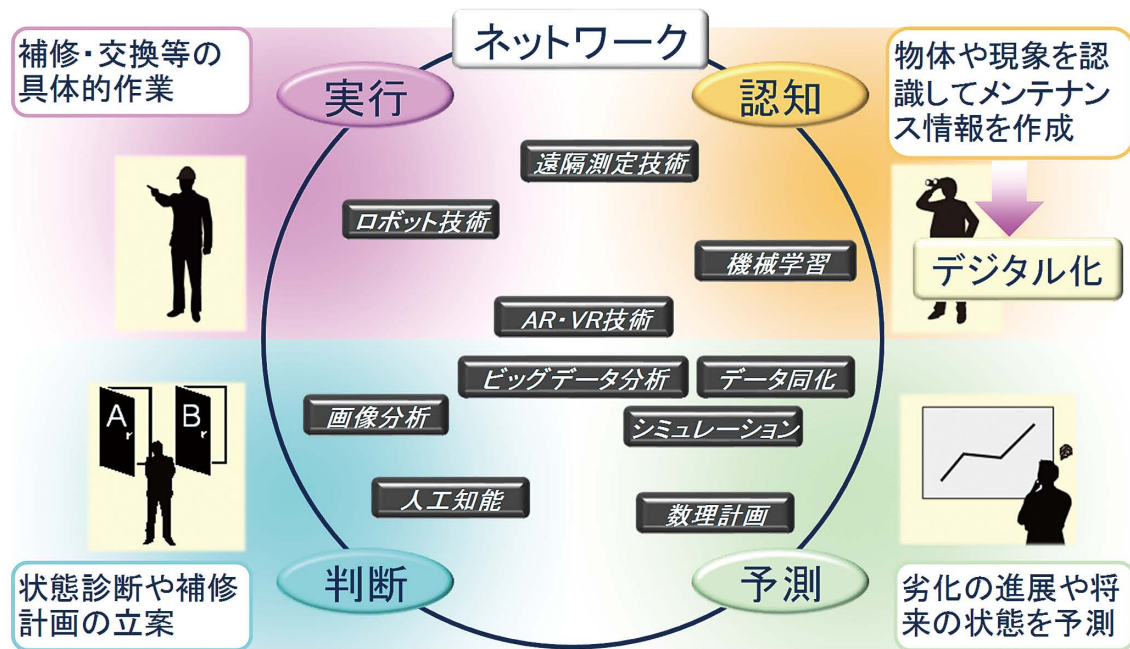


図9 メンテナンスへのICT活用

がネットワークでリンクされ、リアルタイムにメンテナンス情報が交換されることで、システムとして有機的に機能する。そのためには、認知の段階ですべてのメンテナンス情報がデジタル化されていなければならない。

鉄道総研では、前記の4つのフェーズに対して、図9に示すようなICTの要素技術に基づいたメンテナンスに関する研究開発を行っている。本章では、それらの中から代表的な研究開発をピックアップして概説する。

3.2 機械学習による画像認識

機械学習による物体や現象の認識技術はすでに様々な分野で使われており、鉄道総研でも、画像からメンテナンス情報を自動抽出する技術の開発を進めている。

図10は、トンネル覆工のひび割れを自動認識するシステムの概要であり、入力画像に対して多階層型ニューラルネットワーク（ディープラーニング）を用いて90%以上の確率でひび割れを識別し、ひび割れ展開図を自動作成することができる²⁾。

また、前記したRBMの実用化に向けて、線路沿線のリスクアセスメントを自動化するために、線路沿線の構造物や高低差等のハザードをステレオ画像から機械学習を用いて自動抽出し、リスクデータベース（図11）を構築する研究開発を進めている。現状では、抽出精度は70%程度であるが、学習を進めて精度向上を行っている。

この他に、営業車両の屋根に取付けた測定装置（図12）から電車線を連続撮影し、図13に示すような学習

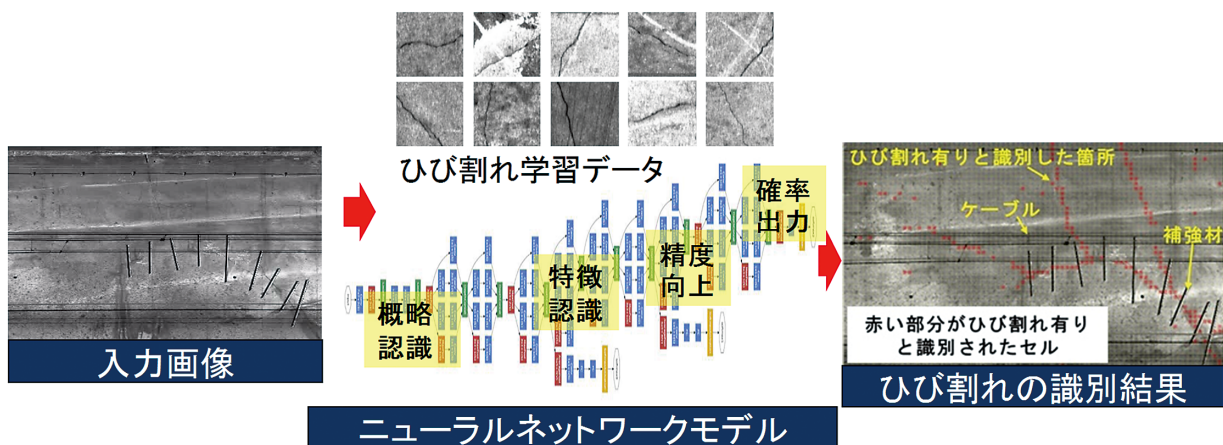


図10 機械学習によるトンネル覆工のひび割れ検出



図 11 線路沿線リスクデータベース(プロトタイプ)



図 12 電車線非接触測定装置

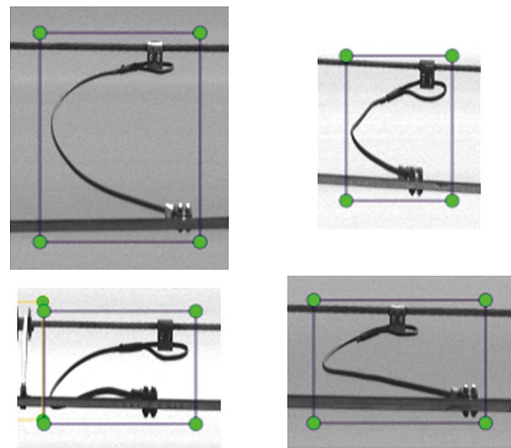


図 13 電車線金具学習データの例

データを用いた機械学習で金具を抽出し、健全度を自動判定する技術開発も進めている。

3.3 検査の効率化

構造物の検査は、高所作業や足場の悪い箇所など危険な箇所が多く、作業の効率化が求められている。鉄道総研では、300m遠方から微小変位を測定可能な高精度レーザー変位計「長距離型Uドップラー」を開発し、高所作業の多い橋りょうを中心に検査の効率化に関する技術開発を行っている。例えば、図14に示すように、斜張橋のケーブルの固有振動数を測定することによってケーブルの張力管理を簡単に行うことが可能であり、数日間の夜間作業が必要だったケーブル張力検査が日中1時間程度に効率化された。

さらに、VR(バーチャルリアリティ、仮想現実)技術を用いた構造物の検査手法の開発を行っている。これ

は、目視検査の際にウェアラブルカメラを着用して検査対象の画像を自動取得して3次元の高精度なバーチャルモデルを作成し、検査記録として残すと共に劣化・破壊の進行を把握するものである。図15は盛土の検査の実験例であるが、作成したバーチャルモデルから、盛土斜面に陥没が発生していることを捉えている。

3.4 予測の精度向上

メンテナンスの高度化において、予測のフェーズへのICT活用にはビッグデータ分析の適用が期待されているが、安全に直結するメンテナンスへの実用展開にはまだ課題が多い。

鉄道総研では、軌道のCBMの自動化に向けて、ベイズ推定を用いた軌道変位予測手法を開発した。ベイズ推定とは、事象を確率分布で予測し、情報が得られる度に予測の確率分布を逐次更新することで予測精度

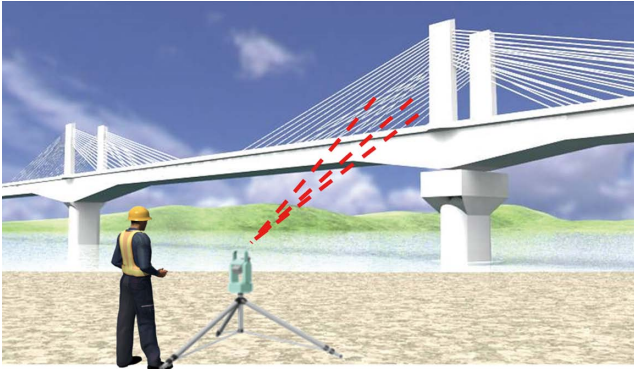


図14 長距離型Uドップラーを用いた斜張橋の検査

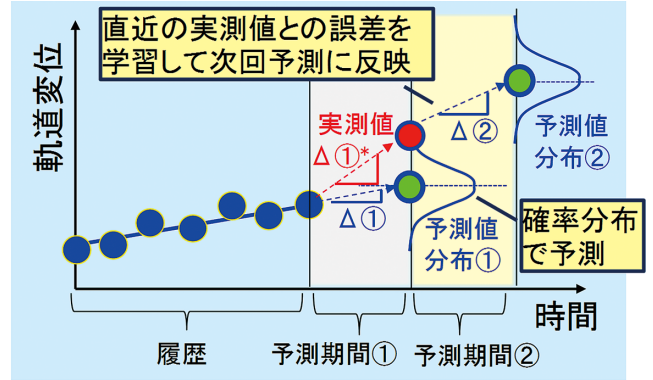


図16 ベイズ推定による軌道変位予測の概念図



図15 VR技術を用いた盛土の検査の実験例



図17 営業車に搭載された慣性正矢軌道検測装置

を向上する統計学の方法論である。図16に本手法の概念を示す。本手法は、営業車に搭載された軌道検測装置（図17）等による高頻度検測で得られる大量の軌道変位履歴データから、数日～数週間先の軌道変位を確率分布で予測するもので、最新の検測データが得られる度に予測誤差を学習して次回予測に反映し、予測精度を向上する。本手法は、1日1回程度の頻度の軌道変位データを取得できれば、15日先の軌道変位を±1mmの誤差で予測可能である。

また、ビッグデータ分析とは逆に、少ない実測データから物体の挙動を精度良く推定する手法として着目されているのが、実測データとシミュレーションを連成させて未知数を推定する技術、すなわちデータ同化である。図18に、データ同化を用いた橋りょうの健全度診断³⁾の概要を示す。通常、列車走行に伴う橋りょうの振動波形を、加速度計で常時監視するためにセンサを1つ取付けても橋りょう全体の変位は推定できない。そこで、設計図面を基本とした橋りょうのシミュレーションモデルを用いて、各種物理特性を前記したベイズ推定で仮定しながら走行シミュレーションを繰

り返し行い、実測データと最も適合する橋りょうの力学モデルを再現することで、健全度を高精度に推定するものである。

3.5 画像分析によるレールの劣化判定

軌道のCBMでは、軌道線形の管理の他にレールや締結装置、まくらぎ、バラスト等の軌道部材の検査も必要であり、これらについては、画像によるモニタリングが採用されている。しかし、部材の欠損やひび割れ等は形状の分析である程度自動判定が可能と考えられるが、レールの金属疲労や材料劣化を画像から定量的に判定するのは困難である。そこで、鉄道総研では、光を電磁波の一種と捉え、レールからの反射光のスペクトル（波長・周波数の分布）を詳細に分析することでレールの疲労や材料劣化を定量的に捉える手法の開発を進めている⁴⁾。

図19に、レールの頭頂面からの反射光を場所ごとにスペクトル解析した結果を示す。鉄道総研で定義したスペクトル強度変化率という指標を用いると、特定の波長帯域において、健全箇所と白色層（熱変性箇所）

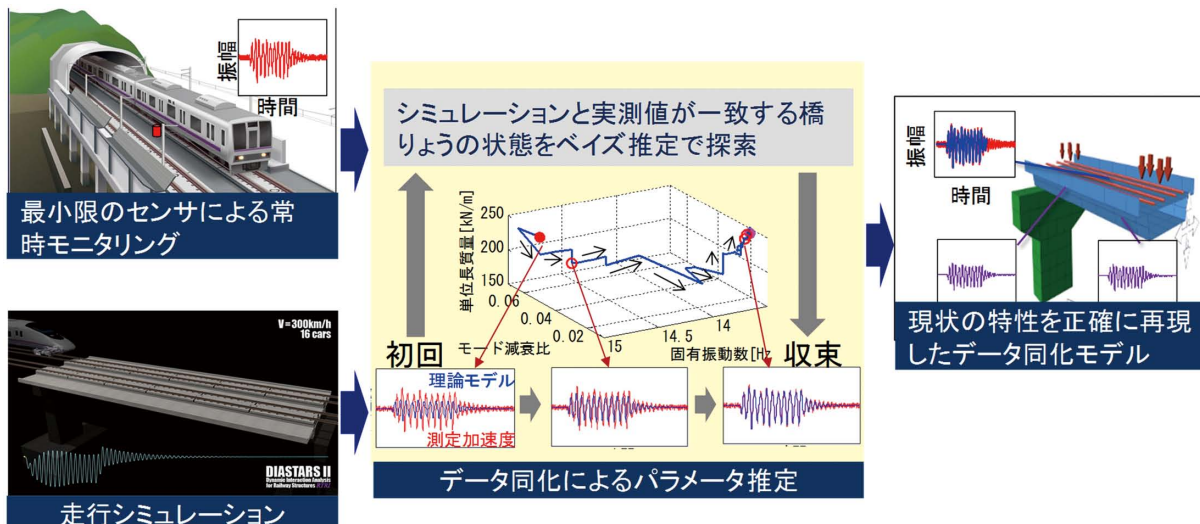


図18 実測値とシミュレーションの連成(データ同化)による橋りょうの健全度診断の概要

に明確な差異がみられることがわかる。この帯域の波長成分のみを強調すると、図20の様に、白色層の箇所を明確に浮かび上がらせることができる。現在、レールの疲労・劣化箇所の抽出に向けて検討を進めているが、今後は、電力や軌道部材への飛来塩分の分析への適用の検討も行う。

4. 持続可能な安全の実現に向けて

「持続可能な安全」を実現するための鉄道メンテナンスには、

- (1) 社会が安心して鉄道を利用するための「安全性の向上(=リスクの低減)」
- (2) 鉄道事業者が鉄道を維持し続けていくための「メンテナンスコストの低減」

が必要である。そこで、【認知】【予測】【判断】【実行】の4つのフェーズに対してICTを活用してメンテナンスを高度化し、省力化・低コスト化を達成することが目標となる。ただし、現時点では、鉄道システムを構成する「車両」「電力・信号」「軌道」「構造物」等の各分野間の連携に関してはまだ具体的な研究開発段階にあるとはいえない。

メンテナンスの高度化の一つの到達点としては、鉄道システムを構成する各分野のメンテナンス情報を一元化して共有し、新たな価値を生み出すことにあると考える。そのためには、

- (1) 分野間での位置情報の統一
- (2) データ形式や通信環境の統一

が必要であり、その上でデータを共有して分析し、相互に有用な情報を交換できる環境を整える必要がある。

鉄道総研では、各分野で位置情報を共有して使用するためのフレームワークの構築を進めている。また、各分野のメンテナンス情報を一元化してネットワーク環境上で管理・分析が可能なシステムプラットフォームとして、軌道変位データベースシステムとして広く使用されているLABOCSをベースとした統合管理シス

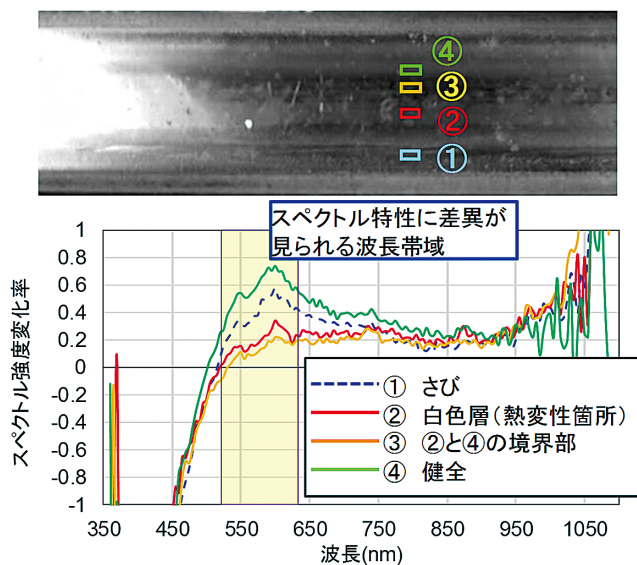


図19 レール頭頂面の画像スペクトル解析

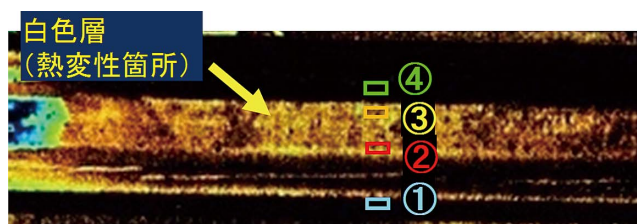


図20 画像処理による白色層の抽出例



図21 ICTを活用したメンテナンス情報の統合管理のイメージ

テムの開発を進めている。

図21にメンテナンス情報の統合管理のイメージを示す。本システムに、本稿で概説した要素技術を実装し、

- シミュレーターと測定データのデータ同化分析
- バーチャルモデルによる変状履歴の確認・分析
- 線路沿線リスクのアセスメント

等をネットワーク環境上で実行することは概ね実現可能と考えている。さらに、将来的には、高頻度軌道検測データから構造物の健全度を推定したり、台車のモニタリング情報から軌道部材の異常を検知するといった、分野間のメンテナンス情報の交換・活用への展開も目指している。

現在、鉄道総研内の所内試験線をモデルとしたプロトタイプを開発中であり、早期の実用化を目指す。

5. おわりに

本講演では、「持続可能な安全」をキーワードに、ICT活用によるメンテナンスの高度化を概説したが、メンテナンスコスト低減には、材料・構造の信頼性・耐久性を向上してリスクを低減し、ライフサイクルコストを改善することも有効である。また、補修作業そ

ものの自動化、ロボットの活用などは、メンテナンスを実際に行っている鉄道事業者で検討が進められているが、鉄道総研でもソフトウェア開発や要素技術等で支援していきたい。

今後とも、鉄道総研のメンテナンスに関する技術開発にご理解・ご協力頂ければ幸いである。

参考文献

- 1) 国土交通省鉄道統計年報 [平成27年度], http://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_tk2_000040.html
- 2) 鶴飼：深層学習を用いたトンネル覆工面のひび割れ検出手法の開発，鉄道総研報告，Vol.32，No.5，pp.5-10，2018
- 3) 松岡，曾我部，上半，渡辺：列車通過時の単点加速度と梁の動力学モデルを用いた鉄道橋の動特性及び変位のベイズ推計，土木学会論文集A1，Vol.72，No.3，pp.420-439，2016
- 4) 坪川，辻江，兼松：ハイパースペクトルカメラを用いたレールの劣化検出に関する基礎検討，第22回鉄道工学シンポジウム論文集，pp.99-105，2018