

車両メンテナンスに関する取り組み

車両技術研究部長
石毛 真



1. はじめに

鉄道車両の安全、安定輸送を確保するためには、車両の性能を常に一定レベル以上に保つ必要があり、そのために検査修繕が実施されている。近年車両の性能が向上するとともに状態監視装置も導入され、車両のメンテナンス性は向上していることから、検査体系の再構築や検査・診断作業の高度化などの取り組みが進められている。本稿では、鉄道車両の検査・診断の省力化・省人化に向けた最近の鉄道総研における取り組みと今後のメンテナンスの方向性について述べる。

2. 車両のメンテナンス

2.1 メンテナンスの種類

車両のメンテナンスの種類を表1に示す。数日に1回の頻度で行われる「仕業検査」および90日毎に行われる「交番検査」は在姿で実施される検査であり、消耗品の補充、取替や各装置の状態、作用機能の確認が行われる。電車の場合、従来、4年または60万km走行毎に実施される「重要部検査」および8年毎に実施される「全般検査」は車両の解体を伴う検査であり、細部について確認が行われる。

表1 車両のメンテナンスの種類

仕業検査	消耗品の補充、取替、集電装置、走行装置、ブレーキ装置等の状態、作用について外部から行う検査
交番検査	集電装置、走行装置、ブレーキ装置、車体等の状態、作用、機能について在姿で行う検査
重要部検査	主電動機、走り装置、ブレーキ装置等主要な機器を取り外し、解体の上細部について行う検査
全般検査	車両各部を解体の上、細部について全般に渡って行う検査



図1 車両のメンテナンスの特徴と方向性

2.2 車両のメンテナンスの特徴と方向性

車両のメンテナンスは、定期検査による予防保全を主体としてこれまで実施されてきた。予防保全には、「時間計画保全 (TBM)」と「状態監視保全 (CBM)」があるが、国鉄時代より「時間計画保全」を主体として実施されてきている。車両のメンテナンスの特徴と方向性を図1に示す。

車両のメンテナンスにおける特徴として、車両の解体を伴う検査が多くあることが挙げられる。例えば車輪のように、走行に伴い摩耗する部品は、定期的あるいは一定走行距離毎の交換が必要となり、その際に車両の解体が必須となる。

車両のメンテナンス、特に解体を伴う検査は、その間車両の運用も止まるため、コストがかかる。また、少子高齢化の傾向を受けて、労働力の確保や技術継承の問題も顕在化している。これらの課題はここ数年のコロナ禍においてさらに深刻化しており、メンテナンスにおけるコストの削減、労働力不足への対応、熟練技術者の引退に伴う技術継承は喫緊の課題となっている。

これらの課題に対応していくために、以下のような方策等が考えられる。

・検査周期延伸

安全性を損なわない範囲で検査周期を延伸することで、解体を伴う検査回数を削減することが考えられる。

2002年3月の省令改正により、車両の検査体系が仕様規定から性能規定に代わり、鉄道事業者は実情を反映させた詳細・具体的な実施基準を作成し国に届け出ることとなった。近年導入される車両は、ステンレス構体やボルスタレス台車、誘導電動機に代表されるように摩耗部品が少なくメンテナンス性が向上した装置が採用されており、従来の検査周期のままでは、過剰な頻度、内容で検査を実施している面もあった。省令改正

以降、多くの事業者において車両の検査周期延伸の検討が行われ、車両の実態に合わせた効率的な検査体系の構築が進められている。

・装置化、脱技能化

労働力不足・技術継承の課題については、人の感覚に依存した検査手法が依然として多いことが、課題解決を難しくしている。熟練技能を必要とする作業をどのようにして自動化・装置化するか、あるいは熟練技能に依らない作業に落とし込むかがまさに課題となる。

・モニタリング活用

近年導入される車両には、モニタリング装置が搭載されており、乗務員の支援の他に、各機器の動作状態の検査や、故障も含めた動作の記録、データ自動収集を行っている。運用中は常時監視しているため、定期検査時の機能確認に比べて、より高頻度に確認できることと、実運用時の状態を確認できる点で、高品質な検査が可能となる。従来仕業検査や交番検査で実施していた機器の動作確認に代えて、モニタリング装置の確認結果を用いることで、高頻度・高品質かつ省力化につながるメンテナンスが可能となる。また、機器の状態を常時監視することで、不具合の予兆を捉えることが可能となり、部品の劣化状態に応じた検査・修繕つまり状態監視保全が可能となる。

車両メンテナンスの方向性としては、従来時間計画保全 (TBM) で行っていた検査を、状態監視保全 (CBM) に移行する流れが主になっていくものと考えられる。

・AIによる診断

デジタル技術の進展と相まって、高機能なモニタリング装置が搭載されるようになったことで、状態監視保全を実現する土台が整ってきたものと考えられる。

AIの進化普及により、データアナリティクスの適用の可能性が広がり、モニタリングの精度向上や、異常

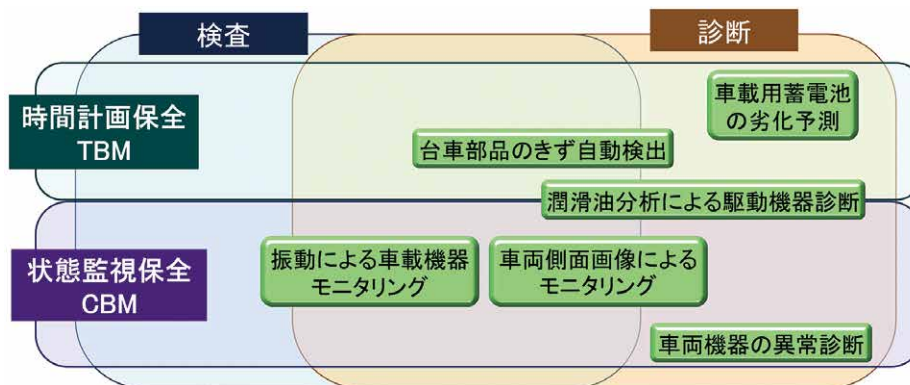


図2 検査・診断の省力化・省人化に向けた取組み

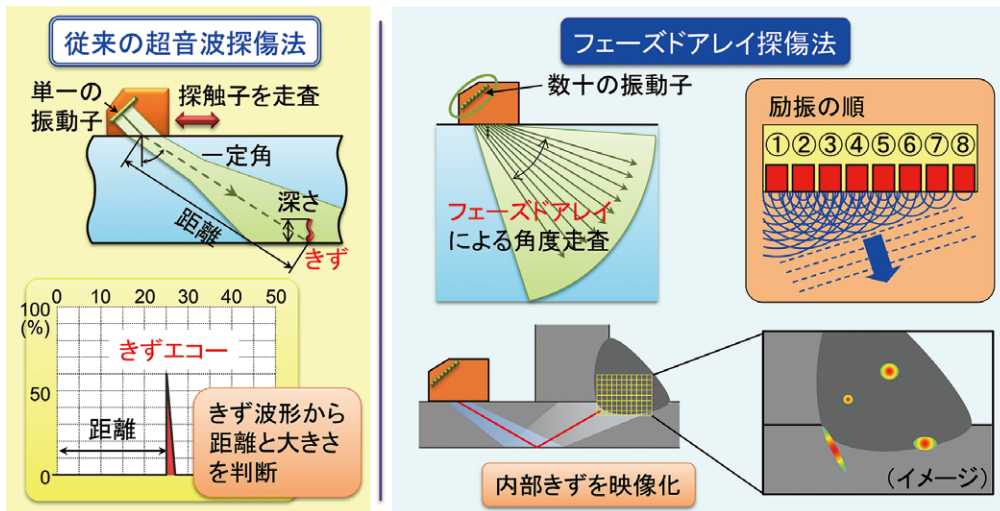


図3 超音波探傷法

判定の高度化・自動化につながっていくことが期待される。従来、熟練技術者により診断していた検査項目についても、AIによる診断への置き換えが期待される。

3. 省力化・省人化に向けた取組み

検査・診断の省力化・省人化に向けた最近の研究開発の中から車両に関する取組みを抜粋し、検査・診断および時間計画保全・状態監視保全で区分して図2に示す。本稿では、これらの中から、時間計画保全に関して「台車部品のきず自動抽出」、状態監視保全に関して「振動による車載機器モニタリング」を紹介する。

3.1 台車部品のきず自動検出

3.1.1 探傷作業の脱技能化

車軸や台車枠などの台車部品に対しては、定期検査時に超音波探傷や磁粉探傷などの非破壊検査が実施されている。従来の超音波探傷においては、振動子を1個のみ有する探触子を用いた斜角探傷法の適用が主流であるが、きずエコーの波形からきずの位置と大きさを判断する必要があり、熟練技術を要する(図3)。近年複数の振動子を有するアレイ探触子を用いたフェーズドアレイ探傷法が注目されている。フェーズドアレイ探傷法では、複数の振動子の位相を制御することで任意の角度に指向性を持った超音波を送受信することができ、探触子を走査することなく入射面内の情報を得ることができる。さらに探傷結果を映像として表示可能となり、視覚的に理解しやすくなることから、きずの見落としの可能性を低減させるとともに、熟練技術に依らないきずの有無の判定が可能となる(図3)。

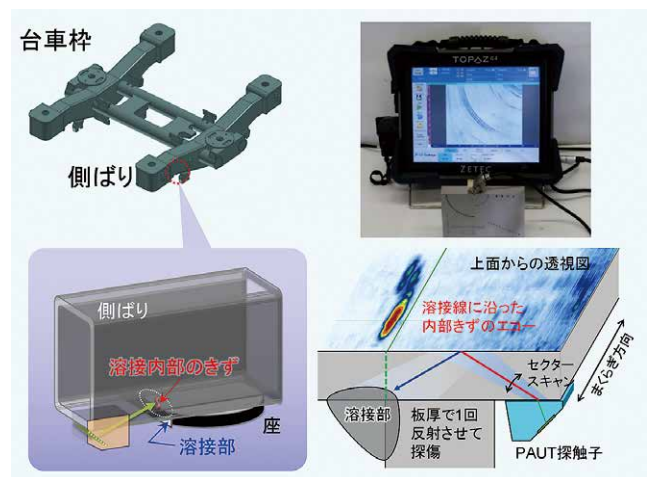


図4 フェーズドアレイ探傷法の台車枠への適用

3.1.2 フェーズドアレイ探傷法の台車枠への適用¹⁾

複雑な溶接部形状を持つ台車枠へのフェーズドアレイ探傷法の適用を試みた(図4)。台車枠側ばり下面の溶接内部のきずに対して、側ばり下面に当てた探触子から板厚で一回反射させて探傷を行い、さらにまくらぎ方向に探触子を走査することで溶接線全体に渡り探傷が行えることを確認した。探傷結果の一例を図5に示す。溶接線に沿った内部きずのエコーが平面像、断面像および側面像に表れており、実台車での探傷結果を明瞭に映像化できることを確認した。なお、超音波探傷では通常表面の塗膜を除去してから探傷を実施するが、塗膜の除去および再塗装作業も検修作業上の負担となっている。フェーズドアレイ探傷法では塗膜厚さ1mmまでの範囲では検出感度の低下は少なく、映像化技術と相まって、塗膜をはがさずにスクリーニン

グを実施し、必要箇所のみを詳細に探傷することで、作業負担を減らすことが可能になると考えられる。

3.1.3 きず自動検出

フェーズドアレイ探傷法の台車枠への適用可能性により、探傷作業の脱技能化が進むことが期待されるが、労働力確保がますます困難になっていくことを想定すると、さらに進めて探傷作業自体の自動化を図ることが求められる。探傷作業にはセンシングと診断があり、センシングはロボット化、診断はAI等を活用した自動診断の実現が期待される。診断を自動化するためには、きずの有無を判定する必要があり、探傷作業で得られた画像からきずを検出するアルゴリズムの構築を目指している。AI（機械学習）を用いるためには、数多くの良質な教師データが不可欠であるが、実台車枠の溶接部のきずの事例は少なく、良質なデータの確保が課題となる。そこで、フェーズドアレイ探傷法の台車枠への適用検討において活用した超音波シミュレーション解析技術を使用して学習データを作成すること

を検討している。台車枠溶接部付け根部分にきずがある場合の超音波探傷シミュレーション解析例を図6に示す。探触子から入射された超音波が板の裏面で一回反射してきずに到達し、きずで反射したエコーがもう一度板の裏面で反射して探触子に到達する様子をシミュレートしている（図6は超音波がきずに到達した瞬間を示す）。超音波シミュレーション解析を用いれば、溶接部の形状やきずの形状、大きさなどをパラメータとして、様々な条件における超音波の反射、伝搬挙動を再現することができる。

図6のようなシミュレーション結果について、実際の探傷において得られるような画像として映像化したものが、図7である。40度から75度の間で首振り入射したとき、板の裏面で一回反射あるいは二回反射したのちにきずに到達したときのエコーが示されており、きずを模擬した探傷結果の画像が得られている。このようにして、様々な溶接形状やきずの有無などの条件を模擬したシミュレーション解析および映像化を行う

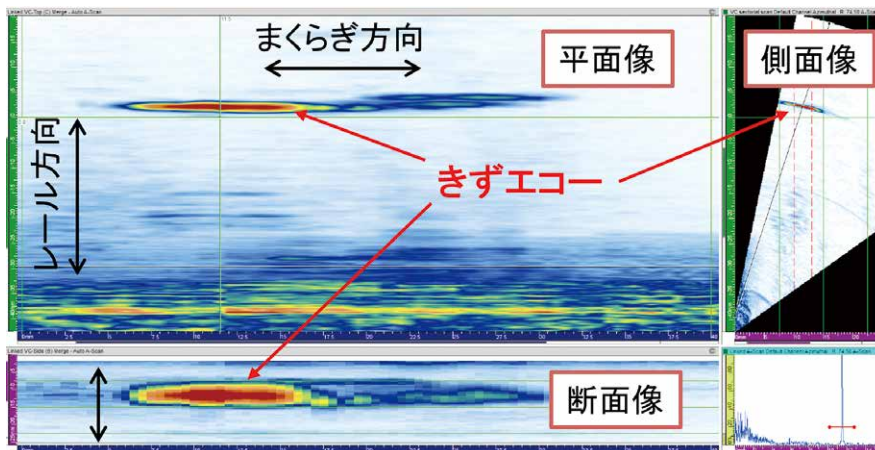


図5 フェーズドアレイ探傷結果

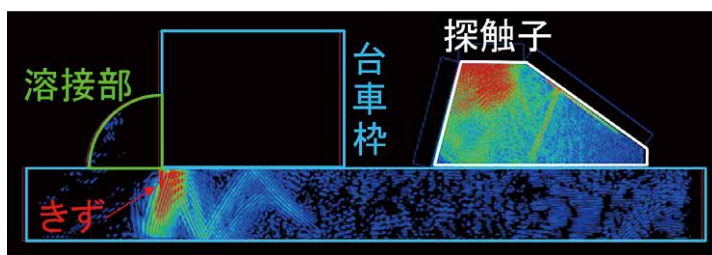


図6 超音波シミュレーション解析

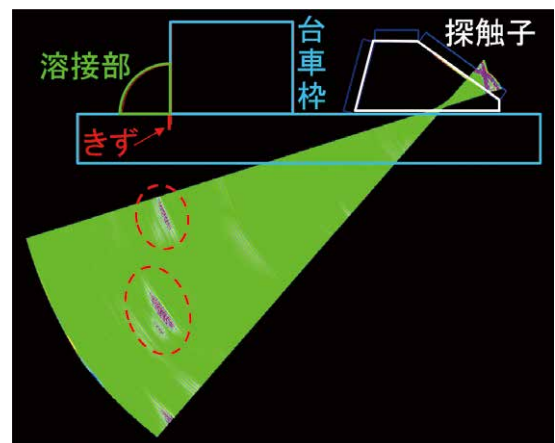


図7 シミュレーション結果の画像化

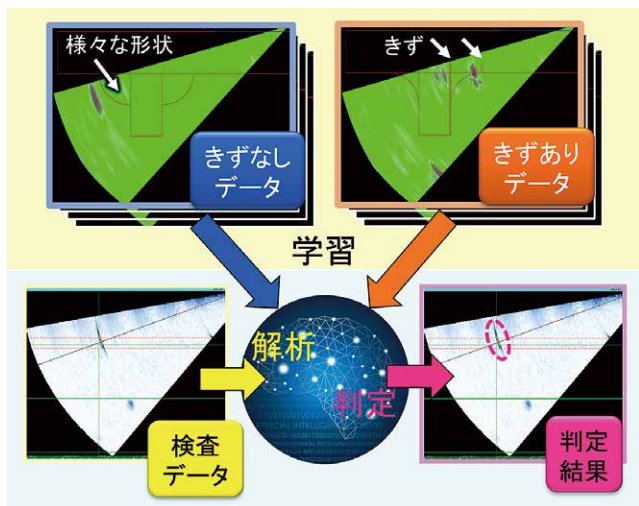


図8 機械学習によるきず自動検出

ことで、数多くの学習データを用意することが可能となる。

実溶接部の探傷結果の画像に加えてシミュレーション解析に基づく探傷結果の画像を用いて機械学習を行うことで、画像からきずの有無を判別するアルゴリズムを構築できる。検査対象となるデータをこのアルゴリズムで処理することできずの検出を行い、探傷結果の良否判定を行うことが可能となる(図8)。

3.1.4 探傷作業の将来像

探傷結果の自動判定が可能となれば、その前段の探傷作業も含めて機械化することが期待される。現状の台車枠の検査工程は、①分解→②洗浄→③塗膜除去→④探傷→⑤補修→⑥塗装→⑦組立であるが、脱技能化の項で述べた通り、フェーズドアレイ探傷法によりスクリーニング検査が可能となれば、①分解→②洗浄→③スクリーニング→④組立の工程となり、スクリーニングで要精密検査となれば、スクリーニング以降の工程は④塗膜除去→⑤探傷→⑥補修→⑦塗装→⑧組立となる。塗膜除去、再塗装の箇所を絞り込むことで省力化が可能になると考えられる。探傷検査の工程が自動化されれば、前後の工程も含めてライン化が進み、探傷作業も含めた一連の工程の省力化・省人化につながるものと考えられる。

3.2 振動による車載機器モニタリング²⁾³⁾

鉄道車両の駆動用機器には、電車の場合はモータと歯車装置、気動車の場合はエンジン、変速機、減速機といった回転機械が用いられる。駆動用機器は故障すると列車の安全で正常な運行を妨げるため、異常を早

表2 振動周波数帯と異常内容の関係

低周波	中周波	高周波
100Hz未満	100Hz～1kHz	1kHz以上
・アンバランス ・ミスアライメント	・ゆるみ ・ガタ	・異常摩耗 ・軸受異常

期に検知して故障を未然に防ぐことが望まれる。機器の異常を検知するための状態監視方法には様々なものがあるが、回転機械の状態監視方法としては振動による方法が広く用いられている。しかし、駆動用機器は工場等に設置される回転機械と異なり運転状態によって複雑に振動が変化し、走行に伴う振動も重畳するため、単純に振動の大きさからしきい値により異常を判別することが困難である。

また、エンジンのような機械では部品点数が多く様々な故障の可能性があり、事前に全ての故障とそれにより発生する振動を予測することは困難である。そこで、振動のオクターブバンド分析と機械学習を用いて異常を診断する手法を提案している。

3.2.1 振動のオクターブバンド分析と機械学習を用いた異常診断

振動のオクターブバンド分析を用いる手法では、測定された全ての周波数帯を対象とするため、事前に検知すべき振動の周波数を特定する必要がない。そのため、エンジンのような複雑な機器を対象とした場合にも容易に適用でき、汎用性の高い状態監視システムの実現が期待できる。

機械学習を用いた異常検知では、学習データとして正常データのみが与えられる場合と、異常データが正常データとともに与えられる場合がある。駆動用機器の場合、予め検出すべき故障を列挙し、それらの故障に対応する異常データを用意することは困難である。そのため、正常データのみを与えて、それとの比較により異常を検知することが求められる。

鉄道車両の場合、回転体のアンバランスやミスアライメント等に起因する振動は100Hz以下の周波数帯に、歯車や軸受等の傷や異常摩耗に起因する振動は1kHz以上の周波数帯に発生すると考えられる。また、ゆるみやガタの状況により、100Hz～1kHzの周波数帯にも異常振動が発生する事例も報告されている(表2)。そこで、100Hz以下を低周波数帯、100Hz～1kHzを中周波数帯、1kHz以上を高周波数帯として振動データ3つに分割し、それぞれの周波数帯で異常

判定を行うことで、異常の簡易診断を実施した。

3.2.2 異常振動検出法

振動のオクターブバンド分析と機械学習を用いた異常検出法では、正常時の振動データ（オクターブバンド分析結果）を学習データとして与え、機械学習を用いて診断対象となる振動データ（テストデータ）が正常な振動に該当するかどうかを判別する（図9）。振動の測定結果を1秒毎のデータに分割し、それぞれについてオクターブバンド分析を行う。1秒毎のオクターブバンド分析結果は、N個の数値から構成され、N次元空間の座標として表すことができる。異常検知を行う際には、各データをN次元空間上の座標で表し、テストデータと各学習データとの空間上での距離を計算し、最も近い学習データとの距離を異常度とし、この距離が基準距離を超えた場合に異常と診断する。本手法は、正常時のデータを学習することで、異常時のデー

タがなくても、異常振動が発生したことを判定できることが大きな特徴である。

3.2.3 現車への適用事例

状態監視システムを気動車に搭載し、営業走行時のデータを収集した。状態監視の対象機器は、車両床下に搭載されているエンジン、変速機、定速回転装置（CSU）、ラジエータの4装置とし、それぞれに振動加速度センサを設置した（図10）。

約9か月間の営業走行時に取得したデータについて、診断プログラムにより分析を実施した。学習データは、外気温の変動に伴う機器の振動の変化を考慮して、各季節から計9日分のデータを選定した。

状態監視システムを適用した車両において、営業走行中に定速回転装置で駆動されているラジエータファンが動作しなくなる事象が発生した。不具合内容を調査したところ、定速回転装置の回転軸に設置されてい

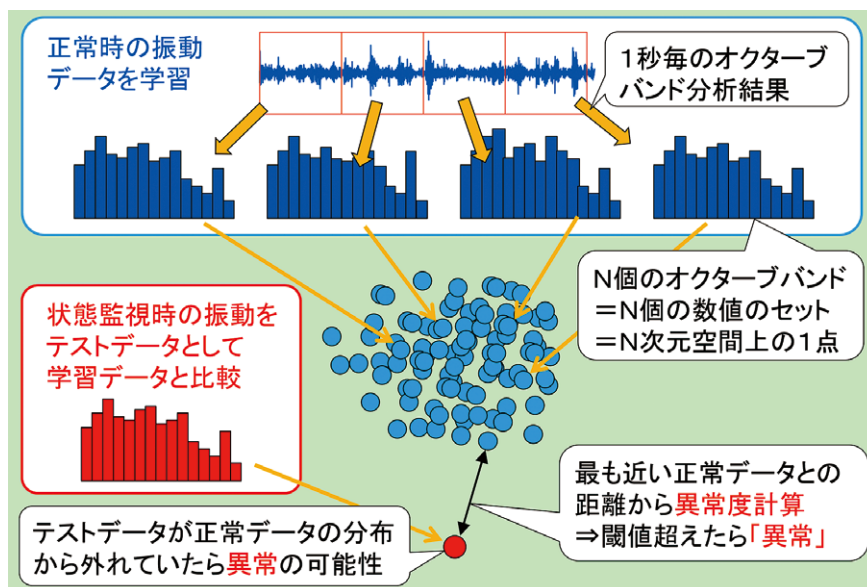


図9 オクターブバンド分析による異常検知

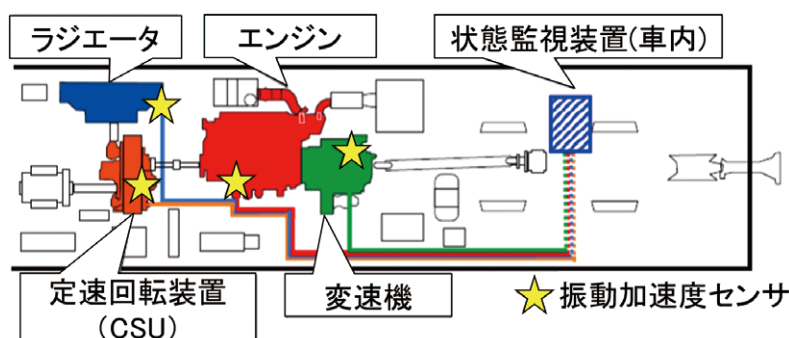


図10 現車適用時の振動測定箇所

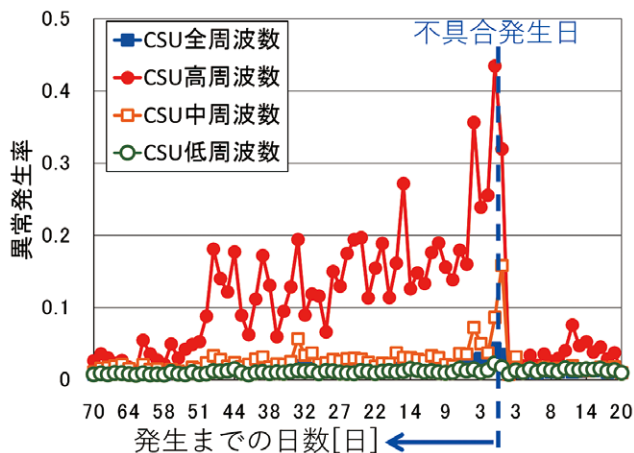


図 11 定速回転装置の異常発生率の推移

るスペーサが摩耗して軸にガタつきが生じていたことが判明した。

定速回転装置の各周波数帯の1日あたりの異常発生率の履歴を図11に示す。全周波数、中周波数、低周波数の異常発生率は、不具合発生日を除いてすべて0.1未満である一方、高周波数の異常発生率は不具合発生の約50日前から0.1を超える値が頻繁に算出され、増大していく傾向にある。また、定速回転装置を取り換えて以降は0.1未満に低下している。このことから、本異常振動検出法の有効性が確認され、周波数帯毎の異常発生率を監視することで不具合を早期に捉えられることが期待される。

4. 今後のメンテナンスの方向性

車両のメンテナンスの方向性としては、解体が必要な一部の検査を除いて、在姿検査の多くは時間計画保全から状態監視保全へ移行することが考えられる。その中で、車両状態監視データの更なる活用、車上データと地上データの連携、そして系統間メンテナンスデータ共有といった各レベルにおけるメンテナンスの高度化が進んでいくものと考えられる。

4.1 状態監視データの更なる活用

状態監視保全への移行を進めていくためには、状態監視データの更なる活用が望まれるが、新たに状態監視項目を追加するためには状態量を物理的に捉えるセンサが必要となる。電機系の装置は機器を動作させるためにセンサを装備している場合が多いが、機械的な装置、部品ではセンサを装備している例は少ない。そこで、電機系のセンサで得られるデータを機械系の診

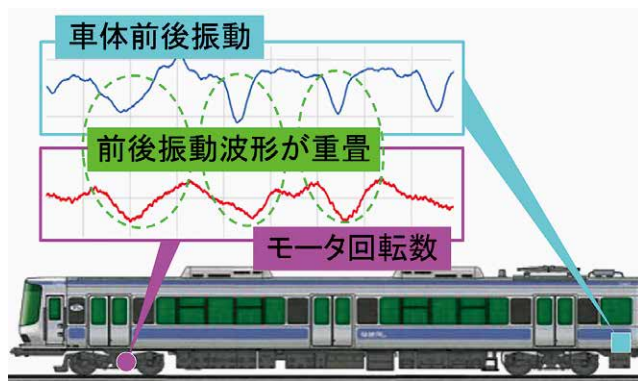


図 12 電機系データによる機械系診断

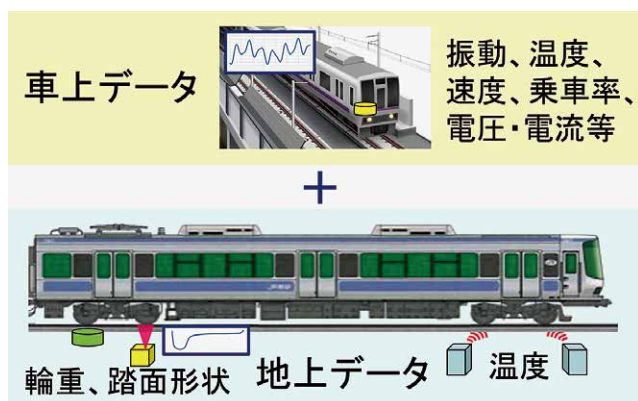


図 13 車上データと地上データの連携

断に活用することで、センサの追設なしに状態監視項目を追加する例を示す。電動車のモータには、制御のために回転数センサが備わっており、常時回転数を測定している。一方、車体の振動については、加速度センサが備わっている例は少ない。何らかの状況において車体の前後振動が発生した場合、モータの回転にも変動が生じるため、モータ回転数の変動を捉えれば前後振動を把握することが可能となる(図12)。車体の前後振動は連結器を介して隣接車両にも伝わるため、電動車のモータ回転数センサで付随車の振動も検出できる可能性がある。これにより、例えば車両の異常な振動発生を編成内の別の車両で検知するなど、異常検知への適用が考えられる。

4.2 車上データと地上データの連携

近年は、車上のみならず地上に設置する車両状態監視装置の導入も進められている。車上測定と地上測定とのデータを組み合わせることでより高度な状態監視システムを実現することが可能となる(図13)。一例と

して、車上で計測される振動や速度などのデータと、地上で測定される踏面形状、温度などのデータを組み合わせることで、損傷の検知や部品の劣化診断が可能になると考えられる。

4.3 系統間メンテナンスデータ共有

将来的に車両、構造物、電力、軌道、信号の各系統間でメンテナンスデータを共有する仕組みの構築が構想されている。車両の走行時は、特に軌道と相互に影響を及ぼし合っていることから、データ共有の仕組みを使って車両データと軌道データを組み合わせることで、例えば車両動揺の管理や、車輪の寿命予測と踏面削正計画の策定といった、車両の品質管理や保守作業の効率化に活用できる可能性が考えられる。

4.4 将来のメンテナンス像

最後に将来の車両メンテナンス像を示す(図14)。今後ますます充実していくことが想定される車両状態監視データおよび地上側で測定される車両データ、そして地上側設備のデータを統合した系統間統合データによる状態監視によって、異常検知や車両品質管理などの車両状態監視の高度化や、劣化診断、メンテナンス計画策定、交換部品準備など定期検査への活用が図られ、メンテナンスの省力化・省人化と車両の品質の維持向上が進んでいくものと考えられる。

5. おわりに

コロナ禍を受けて、より一層顕在化しているメンテナンスコストの削減、労働力確保や技術継承などの課題を解決すべく、メンテナンスにおける検査・診断の省力化・省人化に向けて進めている取組みを紹介した。鉄道車両の安全・安定、そして快適な運行を今後も維持発展させていくために、メンテナンスの省力化・省人化につながる研究開発に取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所 主要な研究開発成果：台車枠溶接内部のきずを容易に検出できるフェーズドアレイ超音波探傷法
<https://www.rtri.or.jp/rd/seika/2021/1-09.html>
- 2) 近藤稔：異常振動の発生周波数帯による車両機器状態の簡易診断，鉄道総研報告，Vol.32，No.1，pp.35-40，2018
- 3) 西谷幸祐，近藤稔，高重達郎，片岡祐太，野口敬太：振動による駆動機器用状態監視システムの営業列車への適用，鉄道総研報告，Vol.32，No.8，pp.23-28，2018

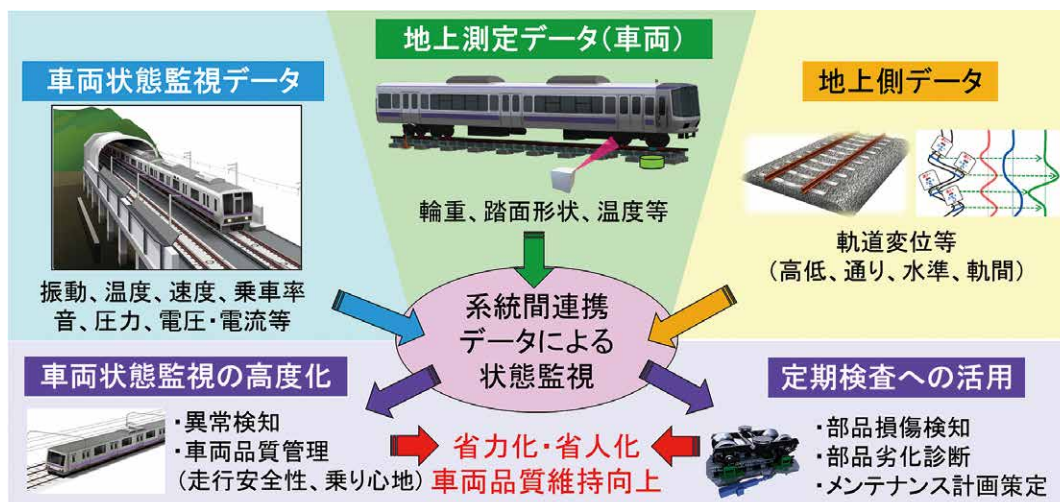


図14 将来のメンテナンス像