

早期検知と予測技術による 鉄道車両メンテナンスの高度化

公益財団法人鉄道総合技術研究所 車両制御技術研究部長

山本 貴光



1. はじめに

鉄道車両のメンテナンスは、鉄道の安全・安定輸送・快適な車両を実現する上で欠くことのできない重要な事項である。近年、鉄道車両の信頼性・耐久性の向上によりこれらを確保しつつ検査周期の延伸が図られている。また、これまでの走行距離・経過時間に基づく定期検査によるメンテナンスにIoTの技術などを取り入れた状態監視技術をはじめとする新たな技術が導入されつつあり、効率化や高度化が行われている。これらの技術への適用に向けた現在の研究開発状況について述べ、今後のメンテナンスの高度化に向けて提案する。

2. 鉄道車両メンテナンスの目的

鉄道車両のメンテナンスの目的は第一に「安全に直結する装置の健全性確保」である。特に一重系で故障が直接安全に影響する装置（例：車輪、輪軸、台車枠など）は綿密で高頻度な検査が行われている。次に「地上設備に影響を与える車両故障低減」が考えられ

る。車両系の故障が地上設備等に広く影響を与えると当該車両だけではなく、当該路線の多数の列車の運行に影響が発生し、復旧にも時間を要する。例えば、パンタグラフなどが該当する。また、「車両運用に影響する故障の低減」が考えられる。車両走行に係る重要な装置（例：電力変換装置、主電動機、エンジン など）に故障が発生すると運休、運用変更、臨時検査などが必要となる。さらに、「旅客サービスに影響する故障の低減」が考えられる（例：ドア装置、空調装置、換気装置、室内灯 など）。これらの装置の故障においても近年では、運休、運用変更、臨時検査などが行われている。

図1に1987年度から2013年度における車両保存費の推移を示す。国鉄分割民営化直後は増加傾向であったが、1990年代中ごろからわずかながら減少傾向を示している。

3. 鉄道車両メンテナンスの現状

3.1 鉄道車両のメンテナンス体系

一般的に予防保全方式には、一定周期（期間や走行距離など）ごとにメンテナンスを行う「時間計画保全（TBM：Time Based Maintenance）」、運転状態の監視・診断を基に異常の検出等、機器状態の変化に応じてメンテナンスを行う「状態監視保全（CBM：Condition Based Maintenance）」があり、また、機器の故障後に修理する「事後保全（BM：Breakdown Maintenance）」がある。車両のメンテナンスでは運転実績や故障実績などを元にして「検査周期」と「走行距離」を定めて、状態監視保全の一部を取り入れた「時間計画保全」（図2）が採用されている。検査での主な実施事項は①異常がある装置の修繕 ②摩耗部品の計画交換 ③摩耗部品交換の判断 ④点検による異常の発見 などが行われる。①②については計画的に実施

単位：千億円

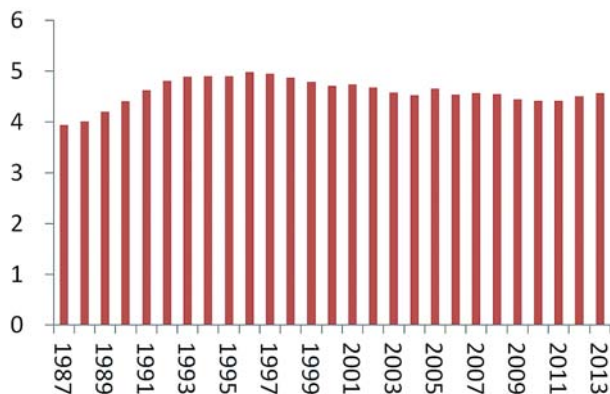


図1 車両保存費の推移（鉄道統計年報より）

検査名称	検査周期	主な検査内容
全般検査	・3～8年に1回 ・90～120万km	・要部検査内容に加え、車体の補修、主要機器の更新などを含む車両のオーバーホール
要部検査	・1.5～4年に1回 ・45～60万km	・交番検査内容に加え、走行関係装置等重要部の分解検査
交番検査	・30～90日に1回 ・3万km(新幹線電車のみ)	・仕業検査内容に加え、摩耗部品の交換、非分解で可能な範囲での検査
仕業検査	・数日に1回	・出庫点検内容に加え、簡単な摩耗部品の交換、故障兆候の調査
出庫点検	・毎日実施	・正常動作の確認

* 検査名称、検査周期は事業者が決定し届出

図2 鉄道車両の「時間計画保全」を採用した検査体系

されるが、③④により異常が発見されると計画外の修繕、部品調達・交換が発生し、計画していたメンテナンス期間では終了せず、車両運用に影響が出る可能性がある。これを防止する手段として一部の事業者では整備済の交換部品を予め準備しておき、1編成分の主要な機器を点検せずに交換して、交換後の部品を点検する方法(循環予備)が採用されている。しかし、対象となる部品は台車(走行用装置を含む)、パンタグラフ、空調装置などの一部の重要な装置に限定されている場合が多い。したがって、これら以外の装置については故障となる前の段階である異常を捉えて計画的なメンテナンスに組み込むことが重要である。

3.2 車両情報記録装置(モニタ装置)

近年、新製された車両はICTの採用により車両に搭載された多くの機器から情報が集められ(図3)、記録するための車両情報記録装置が搭載されている。この装置には自動検査機能が付加されているものもあり、この機能により出庫(出区)点検や仕業検査・交番検査における機能確認の大部分を済ませることが可能となっており、検査時間の短縮に貢献している。

また、異常を捉える作業(3.1章④に示す)は、目視、打音、およびトルク管理など、主に人の手によって行われてきた。近年、IoTの技術などにより、より簡単に多くの情報が集約可能となり、従来の人の手による

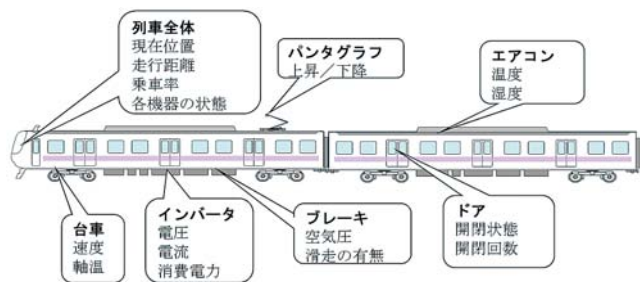


図3 車両情報の例

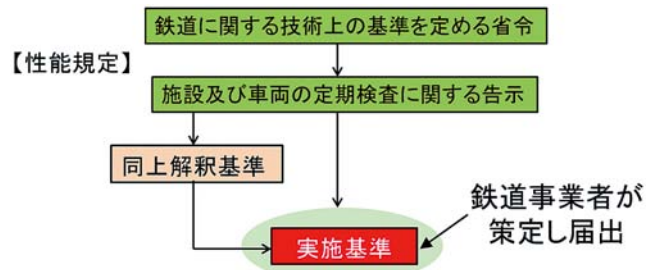


図4 性能規定による新保全方式(2002年4月施行)

発見より、より多くの異常の検出が可能となってきている。車両に搭載される機器は多種多様化しており、事業者毎に特徴がある異常検出技術が取り組まれている。

3.3 周期延伸による低コスト化

2002年4月に鉄道車両の保全を性能規定化する大きな制度の変更があり(図4)、実情を反映した実施基準を事業者が作成して国に届ける方法となった。この制度においては、従来の時間計画保全に加え、装置の実証データによる確認や理論解析等客観的に性能規定への適合を証明した場合には装置単位での周期延伸や検査周期自体の延伸が認められることとなった。近年新造された鉄道車両に搭載された機器の高信頼性を背景としてコスト低減の有効手段である周期延伸の検討が、現在、多くの鉄道事業者で取り組まれている。

4. 早期検知と予測技術によるメンテナンスコストの低減

4.1 早期検知と予測技術

異常を早期に検知(認知)し、異常検知から故障に至るまでを予測できれば、この異常へ対応するための計画が立てやすくなる。異常を早期に検知する手段としては、
 ・ 常時監視技術を併用
 ・ 検知頻度を上げる
 ・ 新たな故障検知手段を採用 などが考えられる。また故障までの余裕を予測する手段としては、
 ・ 実験と強度等から算定
 ・ シミュレーション技術による予測
 ・ これまでの故障データ等から統計的に予測 などが考えられる。重要なことは、できるだけ早期に検知し、予測技術により、故障に至るまでにどれだけの時間的猶予があることを見極めることであり、この時間的猶予が長いほど、定期検査で対応することができる可能性が高くなる。

4.2 メンテナンスの更なる低コスト化に向けた研究開発

低コスト化に貢献する研究開発の例としては「検査内容の効率化」と「運用中車両の故障低減」を紹介する。「検査内容の効率化」については、検査で大掛かりな検査を頻度を低減して効率化を図る「破壊前漏洩概念を用いた輪軸の常時監視手法」を紹介する。「運用中の車両の故障低減」については、地上設備や他列車へ影響が出る前に検知することを目的とした「曲線引き金具のひずみ計測によるすり板段付摩耗の検知手法」および故障・異常を事前に検知することを目的とした「パワー半導体の劣化評価」、「振動による状態監視システム」について紹介する(図5)。

4.2.1 破壊前漏洩概念を用いた輪軸の常時監視手法¹⁾

鉄道車両の輪軸の安全性は無限寿命概念に基づいた設計および定期検査によって保たれており、これらの損傷に起因する重大事故は近年では発生していない。しかし、想定外の欠陥等が存在すると致命的な損傷に至るリスクが存在する。このため、超音波探傷や磁気探傷を用いて定期的に検査が実施されているが、大掛かりな作業である。本手法は中空輪軸の中空部分に圧縮空気などの流体を予め封入しておき、きずが発生・成長して中空部に貫通すると、封入した圧縮流体が漏れ出して圧力が低下するのでこれを検知して損傷を判断するものである(図6)。本手法を鉄道車両の異常の

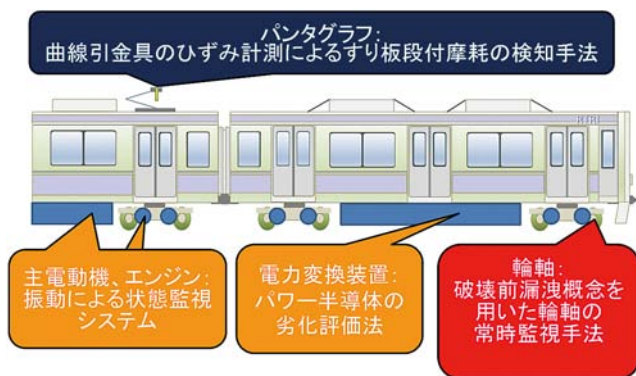


図5 研究開発の適用対象装置

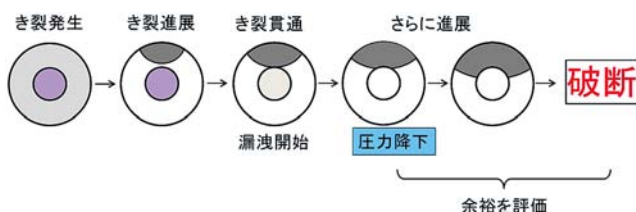


図6 破壊前漏洩概念を用いた輪軸常時監視手法

検知に応用するためには前述したように①確実にき裂検知が可能なこと ②検知から破断に至るまでに十分な余裕時間が得られること が必要であり、これらを実験的に確認した。試験は実物の1/3、内径比0.3と0.5の2つの中空模擬車軸に圧縮空気を封入し、回転負荷を加えながら疲労き裂を発生させて、圧力低下の検知から破断に至るまでの状況を観測した。両方の軸ともきずが内側に到達した段階で圧力が低下し、きずの検出が可能であることを確認した。さらに試験を継続し、内径比0.3の軸は圧力低下後、約1.5万回の回転負荷で破断し、内径比0.5の軸は約11万回で破断した(図7)。この結果から内径比は大きい方が本手法による検知が有利であると考えられる。本手法は輪軸以外にも溶接構造台車枠などにも応用可能である。

これらの実験結果から、実物大車軸に適用した場合の余裕度を破壊力学的に評価した。非常に厳しい条件を設定したとき、き裂検知から破断までの繰り返し数は約5万回、走行距離に換算して140kmに相当する。これまでに対応すれば良いことがわかり、本手法により破断前に貫通き裂を検知できる(図8)。

4.2.2 曲線引き金具のひずみ計測によるすり板段付摩耗の検知手法²⁾

パンタグラフのすり板に段付摩耗が生じると、すり板や舟体が割損し、電車線設備に重大な損傷を引き起こす恐れがある。そのため、この損傷を発生させる異

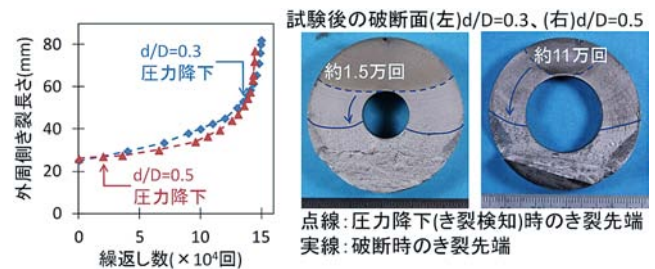


図7 きずの成長状況と破断後の様子

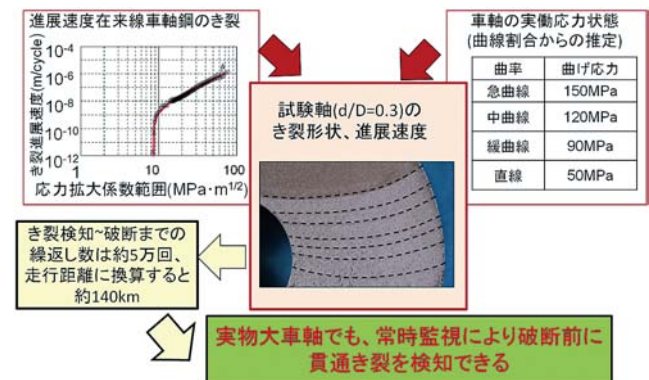


図8 実物大車軸に適用した場合の余裕度を破壊力学的に評価(予測)

常として早期にすり板段付摩耗を検知する手法が求められている。本手法は、少ないセンサ数でかつ営業線に容易に適用可能な段付摩耗を検知するものであり、設置された箇所を通過するたびに高頻度で検出が行われる。

すり板に段付摩耗が発生した状態で車両が走行するとトロリ線支持部に枕木方向の引張力が発生するためこの引張力の波形から検知する。車両の走行速度により、高速であればインパルス的な波形が発生し、低速であれば鋸歯状の波形が発生するが、どちらの波形からも段付摩耗が判断できるアルゴリズムを開発した。

本アルゴリズムを搭載した判定装置、小型・省電力テレメータ送信機、センサ付曲線引金具により安価で確実な段付摩耗検知が実現できる(図9)。本システムを地上側に複数設置し、テレメータ送信機から送られた判定結果を地上で集約すれば、地上側の1箇所を集約して判定が可能となる。

4.2.3 パワー半導体の劣化評価予測技術³⁾

車両駆動用インバータ装置に使用されるパワー半導体は測定が容易な電気的特性により劣化評価が行われてきたが、現状の評価では新品と経年品でほとんど差が見られず、ある日突然、偶発的に故障が発生する。そこで熱特性の一種である「熱抵抗」を精度よく測定

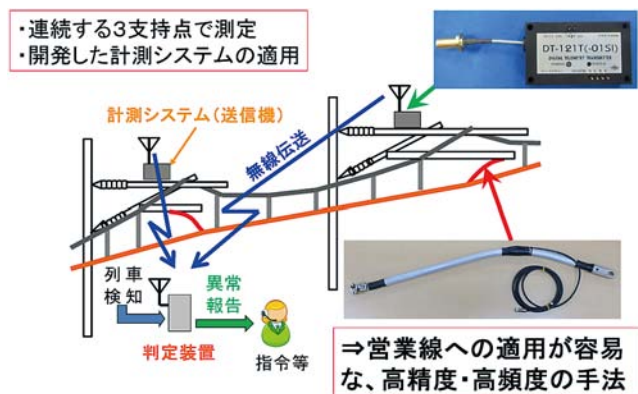


図9 曲線引金具のひずみ計測によるすり板段付摩耗の検知手法

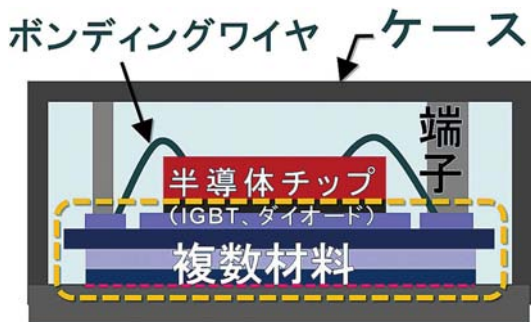


図10 パワー半導体モジュール断面構造例

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。

パワー半導体モジュールはケースと半導体チップの間に複数の材料が積層された構造(図10)となっており、材料毎に熱容量が異なる構造となっている。新品と経年品とでそれぞれの部位における熱抵抗を比較することで良否を判定する。これが大きくなっていけば接合不良やクラックの発生が疑われ、発熱量が同じ場合でも温度上昇が大きくなる。図11では複合材料の4層目の熱抵抗が大きくなっており、劣化の進行が見られた。現状は取り外したパワー半導体の熱抵抗を精度よく評価できる手法を開発した段階であり、今後はIoTの技術を活用して在姿のまま評価を行い、地上へリアルタイムに結果を送れるシステムの構築を目指す。

4.2.4 振動による状態監視システム⁴⁾

車両のエンジンや主電動機軸受の異常検知に振動を測定して判別する手法が試みられてきているが、車両の速度や走行する軌道の条件により振動が変動するため、異常判別を行うことは困難であった。鉄道総研では得られた振動波形をオクターブバンド分析によりN値の数値セットのデータとして取り扱い、N次元の空間の1点として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(図12)。振動波形を記録する

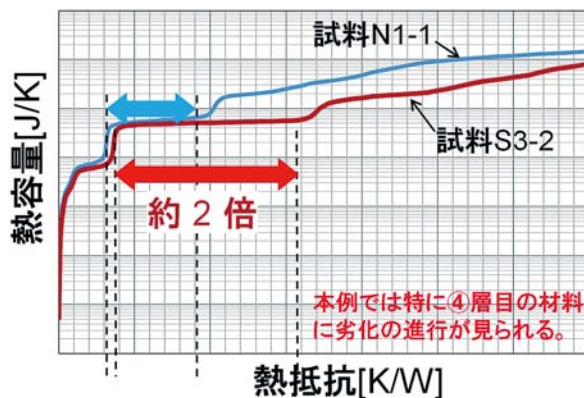


図11 パワー半導体熱抵抗測定例

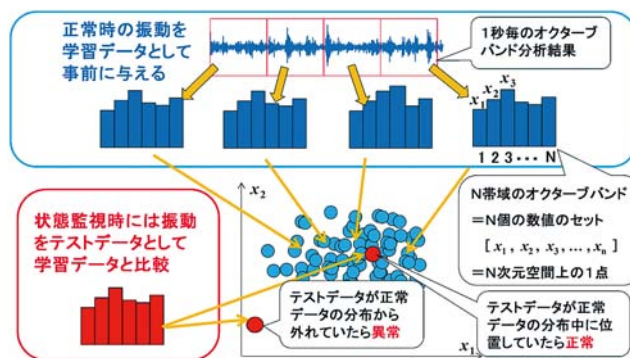


図12 振動による状態監視手法

とデータが膨大化するが、リアルタイムでオクターブ分析した結果を記録することでデータの縮小化を図った。現在は車上に搭載した状態監視装置にデータを蓄積して、異常状態と異常データの関係性を調査している段階であるが、今後はデータを地上に伝送してリアルタイムで異常の診断(機械学習)を連続で実行可能なシステム(図13)の構築を目指す。

5. 鉄道車両メンテナンス高度化に向けて

IoT技術の進歩を受けて、鉄道車両メンテナンスへの適用と高度化が今後ますます期待される。さらに、鉄道車両のデータベースに加え、軌道・電力設備などとの有機的に結合させることにより、さらなる効率的なメンテナンスが期待できる。この実現に向けての提案を以下に示す。

5.1 大規模データベースの構築による異常の検知と高度な利用方法

3.2章で前述した車両情報記録装置に記録された大規模データを活用することにより様々な評価を行うことが可能な「大規模データ分析支援システム」を開発した⁵⁾(図14)。本システムにより、運転エネルギー、補機エネルギー、乗車率、走行抵抗、引張力特性、ブ

レーキ力特性などの評価が可能である。現状は地上に送られてきた車両情報記録装置のデータをオフラインで本支援システムにて評価を行っているが、今後はリアルタイムに情報を取り込んで評価を行い、異常を検知・予測できるシステムの構築を目指す。

前述した車両情報記録装置は年を追う毎に高速・大容量化しており、取り扱う項目も増加しつつある。このデータを図15に示すように複数の車両分と軌道のデータベース、電力のデータベースと一体化することにより車両間の違いによる異常検知や車両・軌道・電力設備状況も考慮した異常の検知が可能となることが想定される。さらに、設備の最適配置(例えば、蓄電設備など)の検討などメンテナンス以外の高度な活用も期待できる。

5.2 大規模データベースとシミュレーション技術を用いた高度な予測技術の可能性

上記、大規模データベースとシミュレーション技術を用いることにより高度な予測技術が可能となることが期待される。例えば、現在研究開発中の車輪-レール間転がり接触解析手法(図16)と上述した大規模データベースを使って今後、波状摩耗の生成メカニズムなど分野を横断した現象の解明や予測などができる可能性がある。

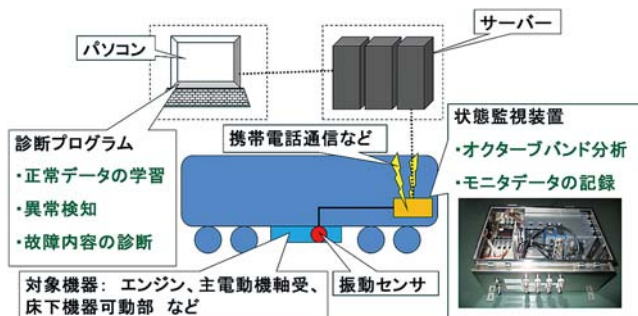


図13 振動による状態監視システム構築例

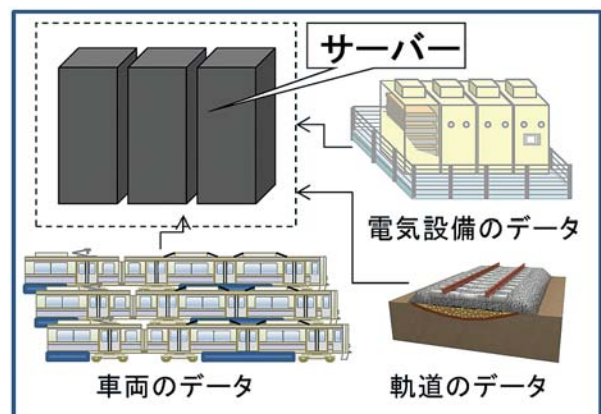


図15 大規模データベースの構築イメージ

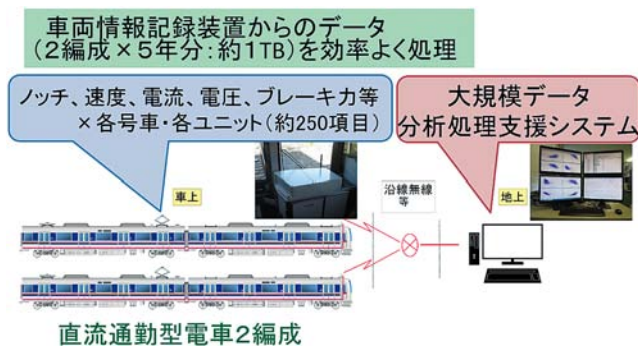


図14 大規模データ分析システム構成

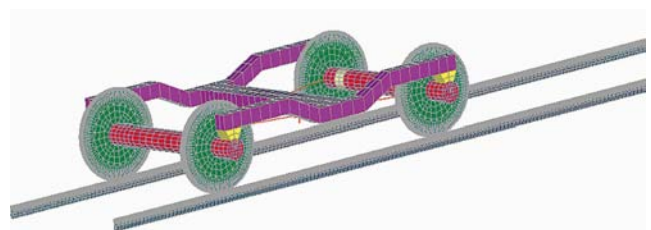


図16 車輪-レール間転がり接触解析手法

6. おわりに

鉄道車両のメンテナンスに関して安全性の確保、鉄道車両故障の低減、鉄道車両メンテナンスコスト低減に向けての現状と、異常の早期検知と予測技術に向けた研究開発について概説した。今後も、鉄道車両の安全・安定を確保しつつ、IoT技術等の適用拡大などによる効率化が強く求められていくと考えられる。鉄道総研ではこれらの要望に対応すべく、より安全で効率化が可能なメンテナンスについて研究・開発に取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 山本勝太, 宮地徳蔵, 八木毅: 破断前漏洩概念を適用した車軸・台車枠のき裂常時監視手法, 鉄道総研報告, Vol.30, No.4, pp.41-46, 2016
- 2) 小山達弥, 臼田隆之, 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 小川知行, 真鍋慎一, 吉川岳, 今村洋一, 影山真佐富: 営業車両における車両情報記録装置を活用した走行抵抗の推定手法, 鉄道総研報告, Vol.30, No.4, pp.5-10, 2016