

# 台車モニタリングに関する最近の技術開発

佐々木 君章\*

## Recent Research Topics on Truck Monitoring

Kimiaki SASAKI

The maintenance of railway vehicles is a very important work to keep safety of passengers. Normally, time based maintenance (TBM) has been applied to railway vehicles in Japan. Although this maintenance system has been provided to ensure safety, but more reasonable maintenance way is needed to improve the efficiency on the maintenance works because it needs great labor and cost. Under that situation, condition based maintenance (CBM) is focused. It is thought that the CBM is effective way to improve the efficiency of vehicle maintenance without deterioration of safety. First, this paper describes the general maintenance system of vehicle in Japan, then it introduces recent researches in RTRI about the truck monitoring as a part of the CBM of the running gear.

キーワード：台車，メンテナンス，モニタリング，状態監視保全，破壊前漏洩

### 1. はじめに

車両を良好な状態に保つメンテナンスは鉄道の安全を支えるうえで欠くことのできない課題である。

従来、車両のメンテナンスは運転実績を元に検査周期と走行距離を定めて行う定期保全（時間計画保全：TBM）の考え方をベースとして行われてきたが、より合理的で効率の良い保守を実現するために、車両状態を監視することにより故障徴候を早期に検知し、故障に至る前に対処する「状態監視保全（CBM）」の考え方が注目されてきている。

鉄道車両において安全性の確保は最重要の課題であることは言うまでもなく、走行機能の大半を担う台車は特に完全なメンテナンスが求められる。

しかしながら、今後の車両メンテナンスにおいては、労働人口の減少などの社会の変化、コスト低減の要請から「確実性」に加えて「効率性」や「合理性」が従来以上に重要になると考えられる。この観点において状態監視保全および診断技術の開発は今後の車両保全の体系を変える一つの方向性を示すものと考えられ、鉄道車両の保全における状態監視保全の位置づけと、その基礎となるモニタリングについて、鉄道総研における現在の研究の中から故障検出手法の研究例および状態監視装置の開発状況を紹介する。

### 2. 保全方式から見たモニタリングの意義

#### 2.1 鉄道車両の保全体系

一般的な保全方式の種類を表1に示す。これらの保全方式はどれか1種類だけで行われるものではなく、故障の影響度、確率など、対象の性質に合わせて組み合わせで実施されているのが普通である。

鉄道車両のメンテナンスは走行距離を併用する時間計画保全方式を中心を実施されてきている。2001年までは、車両の性能向上や故障実績を反映して徐々に周期延伸がなされてはきたが、検査の箇所や周期を一律に国が定める保全体系となっていた。

これに対して、図1に示すように大きな制度の変化が2001年12月にあり、それまで国が策定してきた保全の実施基準を、事業者が実情を反映して作成し、国に届ける仕組に改められた<sup>1)</sup>。

この制度では装置の構造改良や客観的な安全性証明等により検査周期の延伸が認められ、保全方法の合理的な改善を行う環境が整ったといえる。

表1 保全方式の種類

方式	概要
事後保全 (BDM)	機器の故障後に修理する方式
時間計画保全 (TBM)	一定周期（または走行距離などの稼働量）ごとに予防的にメンテナンスを行う方式
状態監視保全 (CBM)	運転状態の監視・診断を基に、故障徴候の検出等、機器状態の変化に応じて予防的なメンテナンスを行う方式

\* 車両構造技術研究部 部長

特集：車両技術

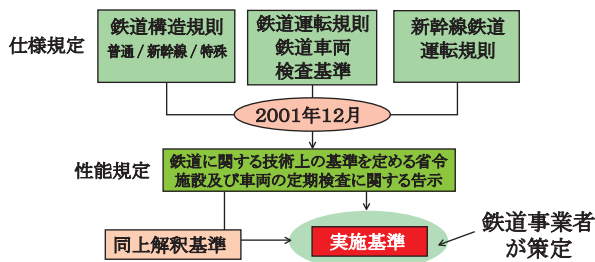


図1 鉄道車両の保全体系

2.2 状態監視保全とモニタリング

時間計画保全方式はバスタブ曲線と呼ばれる図2のような劣化モデルで部品の故障率が推移することを仮定している。これは使用開始直後は部品に内在する初期欠陥などが顕在化するため故障率が高く、これが終ると一定の確率で故障が発生する偶発故障期と呼ばれる安定期になり、最終的には摩耗等により故障率が増加していくとするモデルであり、時間計画保全は故障率が増加していくタイミングで部品交換などの保全を実施することにより効率的な保全を実現しようとしている。

しかし、実際の故障率の推移を部品ごとに調べてみると、図3のような多くのパターンがあり、摩耗故障期のような故障率増加型よりも故障率一定もしくは減少型の推移を示すものの方が多いことが報告されている<sup>2)</sup>。

故障率一定・故障率減少型の故障パターンでは故障防止の観点からは定期的な部品交換は無意味もしくは有害であり、取り付けミスなどのヒューマンエラーの可能性を考慮すると、できるだけ触らない方が良いことになる。

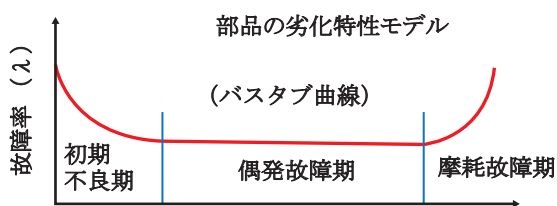


図2 TBMが想定する故障率パターン

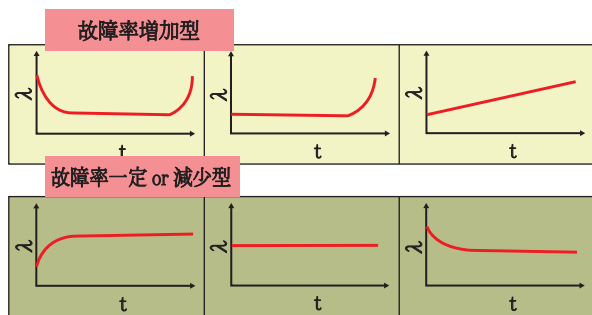


図3 様々な故障率パターン

一方で輪軸や台車枠など一旦故障が発生すると、事故などの重大な結果になると予見される部位においては、故障確率だけで定期保全の有効性を考えることは適切でない。図4はきず入りから破断までの損傷の進展と検査周期の関係について概念を示したものである。事故を防ぐためには、きず入りから最終的な破断に進展するまでのどこかの段階で異常を発見し、修復する必要がある。従って、検査周期は損傷が検出限界に達する時点から最終的な破断に至るまでの時間に対して、余裕を持っておさまるように設定しなければならない。このため、検査方法の感度（見つかる損傷の大きさ）は検査周期の長さや余裕度に大きく影響することになり、より高感度の検査方法が求められる。

これとは逆に、感度の低い検査方法であっても簡便に行えるものなら、検査周期を短くして余裕度を向上することが考えられる。この方向を極限まで追求すると、車上における常時モニタリング・自己診断システムの形態に行き着く。この方法は定置での発見が難しい事象や、損傷発生から破断に至るまでの時間が極端に短い部位に対しても有効である。また、モニタリングを併用することにより、故障により重大な影響を及ぼす部位であっても、故障率推移をベースとする検査周期の合理化ができる可能性がある。

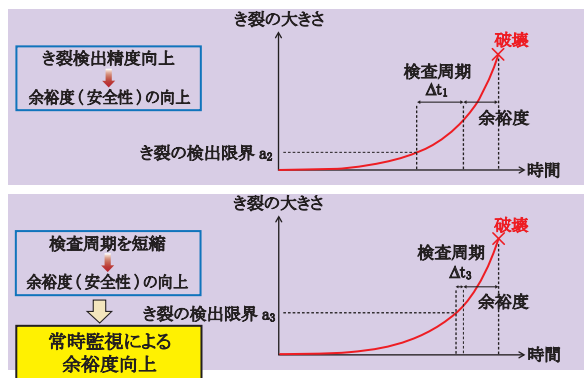


図4 損傷進展と検出感度・検査周期の関係

3. モニタリングシステムの研究状況

3.1 ダンパ機能の健全性監視<sup>3)</sup>

例として台車の振動状況から軸ダンパの減衰力異常を検出する方法を図5に示す。台車枠に取り付けた加速度センサの信号から、台車枠の振動を上下並進成分とピッチング成分に分解し、それぞれについて着目する周波数成分を抽出する。1両に8本ある軸ダンパのどれかの減衰力特性が変化すると、並進とピッチングの位相関係が変化するので、両者の位相差を算出し、位相差が所定の範囲を逸脱した場合に異常と判断する。また、故障ダンパの部位によって正常範囲の逸脱方向が異なることを利

用し、故障ダンパの部位（前／後軸側）を特定する。

本アルゴリズムによる軸ダンパ減衰力の異常検知試験を、車両試験台の実走行模擬加振により実施した。

可変減衰軸ダンパによる上下制振制御システムを備えた試験車両の制御用信号を本アルゴリズムの評価用信号として用い、8本中1本の軸ダンパの減衰力が発生しなくなったことを想定して、1本の軸ダンパを減衰力最小の状態にして加振した。その結果、異常検知指標である位相差が35～45degの範囲を超えたことを判断することで、ダンパの減衰力異常を検知できることがわかった（図6）。また、この範囲は走行速度によって変化することがわかった。

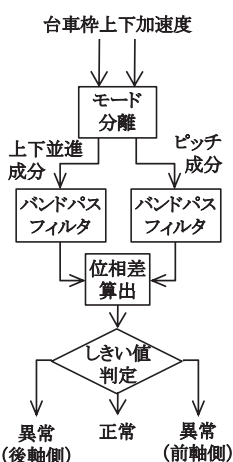


図5 位相差によるダンパ異常検知アルゴリズム

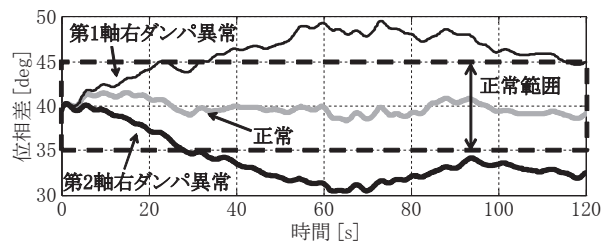


図6 ダンパ異常検知試験の結果

### 3.2 車軸・台車枠のき裂監視

破壊前漏洩（LBB）概念<sup>4)</sup>を用いた輪軸・台車枠の常時監視手法を紹介する。この手法は中空輪軸や溶接構造台車枠など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、これを検出して損傷を判定するものである。車軸や台車枠の疲労破壊は脱線等の重大事故に直結するため、これまでも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、人手を要する大掛かりな作業であるので、頻繁に行うのは困難だった。本手法は閉空間内のどこで発生したきずであっても、圧力という観測しやすい物理量を用いて容易に発生を検知できる。また、完全に

在姿状態で検知できるため、手軽であり、装置の構成によっては常時監視が可能であるなどの利点がある。

一方で、本手法を鉄道車両の故障徴候の検知に応用するためには、①確実なき裂検知ができること、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、の2点を確認する必要がある、これらを実験的に確かめた。

内径比（内径／外径）0.3および0.5の軸の平滑部に成長したきずの成長状況を図7に示す。両方の軸ともきずが内側に到達すると直ちに圧力が降下し、検出が可能であることが確認された。さらに試験を継続すると内径比0.3の軸は圧力降下後、約1.5万回で破断したが、内径比0.5では破断までの負荷回数が約11万回となり、内径比の大きい方が余裕度が大きいことがわかった。破断状況を図8に示す。

車軸には車輪や歯車などが嵌合されている圧入部があるが、ここでの適用性を確かめた。内径比0.35の軸に発生した圧入部のきずでは、平滑部と同様に先端が中空部に達した段階で圧力が降下し、検出から破断までの繰り返し回数は約7万回だった。

これらの結果を用いて、実物の車軸が圧力降下から破断までにどの程度の余裕を持つかを材料のき裂進展速度、想定される実働応力から破壊力学的に評価すると、余裕の少ない内径比0.3の軸が大きな負荷を受ける急曲線区間を走行する状況において、5万回（走行距離換算140km）程度となり、常時モニタリングを行えば破断に至る前に検知可能であることがわかった。

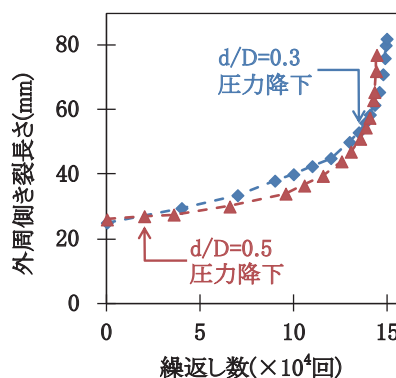
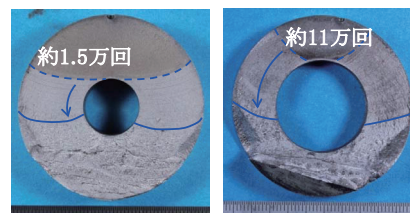


図7 繰り返し負荷によるきずの成長状況



点線：圧力降下(き裂検知)時のき裂先端  
実線：破断時のき裂先端

(a)  $d/D=0.3$  (b)  $d/D=0.5$

図8 中空軸の破断状況

特集：車両技術

3.3 自律型台車健全性監視装置

鉄道車両の状態監視型保全を推進していくためには、前項のような故障徴候を早期に発見する技術開発と合わせて、それらのセンサ信号を監視し、安全運行の判断や保守作業に活かすシステムが必要である。

鉄道車両の走行機能はほとんどが台車に集約されており、走行安全性維持の観点からは、特に台車に対して上記のシステムの必要性が高い。このようなシステムにおいては監視用のセンサが多数になることが予想され、設置環境も厳しいが、監視装置自身の信頼性維持に労力が費やされるようでは本末転倒になる。

このため、図9に示す「自律型台車健全性監視装置」と呼ぶシステムの開発を行っている。

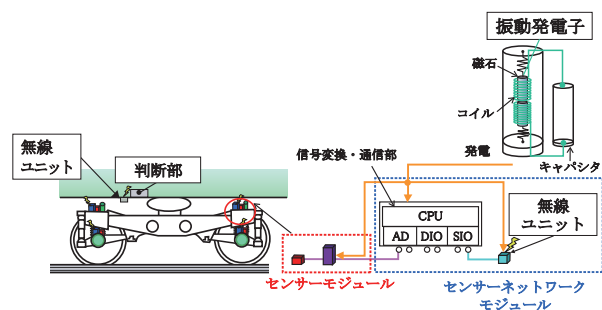


図9 自律型台車健全性監視装置

このシステムは、センサ、無線ネットワーク端末、発電モジュールを一体化して、台車監視の必要な場所に設置し、車体側に設けた判断部で無線により複数のセンサ信号を集めて脱線等の走行安全に関係する異常および故障徴候を判断する。判断した情報は上位の列車情報管理システムに送られ、列車速度制御、運転士への情報提示・メンテナンス情報に用いられる。

ユニット間の配線が不要なため、設置の自由度が高く、メンテナンス作業の邪魔にならない。また、設置後は電子機器であることを忘れて放置しておけるシステムとすることを目指している。このため、システムの自己診断機能が必須であり、集めている複数のセンサ信号の整合性を判断して自己の健全性をチェックする。

現在は主要要素の試作と構内試験線による動作検証が終わった段階であり、今後、信頼性や設置性の検証を進めていく予定である。センサの種類は監視対象により適宜選べる構成としており、最終的には14項目の監視を行う計画であるが、現時点では走行安全性を担保する上で優先度が高いと考えられる表2に示す3項目に絞って故障徴候検出アルゴリズム等の開発を進めている。

この構成では、計測部が台車内に分散して配置されるため、無配線で電力供給する方法が問題になる。軸箱に配置される計測部では軸端に設けた磁石と、本体側に設けたコイルにより容易に発電が可能であるが、取り付け

表2 優先して開発中の監視項目

監視対象	検知すべき現象	検知する物理量	介入レベル
走行安定性	蛇行動による異常振動	台車枠加速度	警告、保守用
車軸軸受機能	剥離損傷	軸箱加速度	警告、保守用
	溶着損傷	軸箱表面温度変化率	介入、警告、保守用
ダンパ機能	減衰力異常	車体、台車枠加速度	保守用

位置によってはこのようなエネルギー源が期待できない。

このため、車体側のアンテナから非接触給電する方法や、走行風による発電など様々な方法を検討したが、大きさや発電能力など方式によって一長一短がある。現時点においては動電型（コイルの中に磁石を配置して振動で発電）の振動発電を中心に開発を進めているが、上記の理由により複数の方式を並行して検討を行っている。また、発電モジュールの給電能力と大きさには密接な関係があり、実用的なシステムを構成する上で、計測部の省電力化も重要な課題である。これは計測部内の各機能ブロックに対して、電力の供給に必要な時だけに制限するようソフトウェアでの対応を図っている。

開発した試作システムは鉄道総研の構内試験線で走行して動作試験を行った。この結果、計測動作や車上への伝送などが機能していることは確認できた。一方、現状では振動発電による供給電力だけでは計測部の消費電力が賄えておらず、今後、省電力化と発電能力の向上の両面で性能向上を図っていく。

4. おわりに

本稿では車両保全における今後の方向性の一つとして、状態監視保全の適用による合理化について述べ、この実現のために現在鉄道総研で研究を行っている台車モニタリングについて、いくつかの事例を紹介した。

非常に高度な安全性が要求される鉄道車両において、メンテナンスの重要性は今後も変わることはない。一方で、メンテナンスの確実性を保ちながら、省力化などの要請に対応していく必要があり、今後も技術開発を続けていくことが必要と考えている。

文献

- 1) 車両関係技術基準調査研究会，車両関係技術基準作業部会編：解説 鉄道に関する技術基準（車両編）改訂版，日本鉄道車両技術協会，2006.11
- 2) 機械設備の振動による状態監視の動向：渡辺幸夫，第8回振動計測クラブ，2009.08
- 3) 小島崇，菅原能生：車両の振動位相差に着目した上下動ダンパの異常検出，鉄道総研報告，Vol.26, No.10, pp.17-22, 2012
- 4) 矢川元基編：破壊力学，培風館，p.145, 1988