

軌道の検査・監視技術に関する最近の動向

古川 敦*

Recent Tendencies of Track Inspection and Monitoring Techniques

Atsushi FURUKAWA

Track inspection and monitoring systems are one of the most important technologies for track maintenance. For effective and labor-saving track maintenance, several types of new system or device are being developed by many bodies. Particularly in Europe, some European Norms of track inspection are established to standardize their technologies and to expand them to the world. In this paper, the author explains recent and future trends of track inspection and monitoring technologies, especially focusing on track geometry measuring and frog defects detecting systems.

キーワード：軌道検測，レール凹凸測定，モニタリング，欧州規格

1. はじめに

軌道は列車の繰り返し走行によって変形，摩耗，劣化が進展する。したがって，様々な検査を定期的に行い，必要により保守を投入している。このため，軌道検測車に代表される検査装置がこれまでも多数開発されてきたが，今後のベテラン社員の減少や人口減少に伴う要員そのものの減少も踏まえ，これまで以上に検査・監視の装置化が必要となる。これに対し本稿では，軌道変位，レール凹凸および分岐器クロッシングを対象に，最近の検査・監視技術を紹介するとともに，この分野における海外の動向を解説する。

なお，本稿は技術動向の解説を目的としており，個々の技術の細部には触れていない。これについては文末の参考文献を参照していただきたい。

2. 検査・監視を装置化する意義

検査や監視の装置化には様々なメリットがあるが，これは大きく以下の4つに分類できる。

- (1) 作業効率向上（人の負担を減らす。）
- (2) 精度向上（正しく測る。）
- (3) 頻度向上（何度も測る。）
- (4) 機能向上（人間では見えないものを測る。）

(1), (2) については，例えば人が糸を張って軌道変位（軌道狂い）を測定することを考えれば，そのメリットは明らかである。(3) は，従来はあまり大きな要素ではなかったが，近年，営業車両搭載形の各種検査装置が開発される

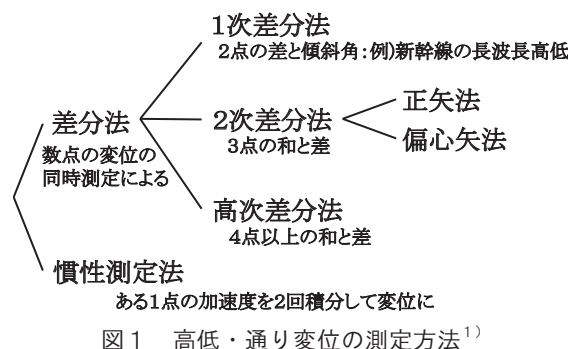


図1 高低・通り変位の測定方法¹⁾

につれて，その価値が認識されつつある。検査の頻度を高めることで軌道状態の急変を早期に検知できるようになり，安全性の向上や保守計画の効率化に寄与している。なお，定置式のモニタリングシステムのメリットもここに分類される。(4)はレールの頭頂面凹凸や内部傷のように，人間の目では測定そのものが難しい検査が該当する。

このように，装置化の意義は明白であるが，その主たるメリットは使用方法によって変化する。新技術の開発にあたっては，最終的にどのようなメリットが求められるのかを考慮する必要がある。

3. 軌道形状の検査

3.1 軌道検測

軌道形状の検査のうち，いわゆる軌道変位の測定を，通常「軌道検測(または単に検測)」と呼んでいる。軌道検測は，高低，通り，水準，軌間，平面性の5項目について行われる。このうち後の3項目は2本のレールの相対的な位置であり，基本的な測定方法は国内外で同一である。一方，高低，通りは2本のレールそれぞれの長手方向の形状であり，図1

* 軌道技術研究部 部長



図2 慣性正矢軌道検測装置（九州新幹線）

に示すいくつかの測定方法がある。日本では2次差分法の一つである正矢法が鉄道開業以来用いられている。この方法による軌道検測車では、等間隔（一般に5m）に並んだ3組の測定装置を必要とする。この代表例が、旧国鉄が開発したマヤ34や、新幹線用の921形11号車（初代のドクターイエロー）である。

一方、921-11のような3台車方式の軌道検測車では高速走行時に中間台車の走行安定性が問題となるため、営業車両と同じ2台車構造で構成できる、偏心矢法による軌道検測車が開発された²⁾。このタイプの軌道検測車は、1997年にJR東日本東北・上越・長野新幹線用921-32が最初の実用機として登場し、現在の主流となっている。なお、測定原理が偏心矢法であっても出力は10m弦正矢法であり、軌道管理の方法は従来と変わらない。

一方ヨーロッパでは、従来は日本と同様に差分法による軌道検測車が主流であったが、現在は慣性測定法によるものが増えている。これは、慣性測定法は測定装置が1組で済み、車両への取り付け構造の自由度が高いことが理由と考えられる。さらに、ヨーロッパではEN13848-5³⁾において、軌道整備基準値（正確にはImmediately action limit：緊急整備限度値）を実振幅で定めている。実振幅は、慣性測定法による検測では出力をそのまま使用できるが、差分法の場合は、出力に対し検測特性に応じた復元処理を行う必要がある。このことから、ヨーロッパでは今後、測定方法のみならず管理方法も慣性測定法を前提とする意向と想定される。日本では、すべての事業者が高低・通り変位の整備基準値を10m弦正矢法による値で定めており、後述の慣性正矢法が必要とされる理由の一つとなっている。なお、ヨーロッパではEN13848-2⁴⁾で軌道検測車の要求仕様を規定しており、この面での標準化も進められている。

日本でも慣性測定法による軌道検測技術は開発されていたが⁵⁾、2回積分に伴う波形のひずみが嫌われて、通常運用される（差分法による）軌道検測車の補完的な役割しか与えられていなかった。

日本で慣性測定法による軌道検測装置が軌道の定期検査用として実用化されたのは、2009年から九州新幹線で運用されている慣性正矢法が初めてである（図2）。慣性正矢法は、測定の原理そのものは従来の慣性測定法と同様であるが、2回積分の過程で正矢法の特徴を持つフィルタ処理を施すことが特徴である⁶⁾。これにより、上記の波形のひずみが避けられるとともに、10m弦正矢法の波形が出力されるため、従来の軌道整備基準をそのまま適用できる。また、10m弦正矢法の出力には曲線半径の情報が含まれているため、曲線線形管理にも活用できる。一般に慣性測定法では曲線半径の情報を出力できないため、ヨーロッパで使用されている軌道検測車では、台車のボギー角等、他のデータによってこれを補完している。

慣性正矢法による軌道検測装置、特に車体装架タイプのもは、わずかな加工で一般の営業車への取り付けが可能となる。この長所を活かし、現在では営業列車による高頻度軌道検測への応用研究が進められている^{7) 8)}。

3.2 レール凹凸測定

地盤振動や沿線騒音、あるいは衝撃的な輪重による軌道部材の損傷を避けるためには、レール凹凸の測定が重要である。これには以下の方法がある。

(1) 軸箱加速度・床下騒音

レール凹凸の振幅は軌道変位と比較すると1/100～1/1000程度で非常に小さく、特に車上から直接測定するのは困難であった。したがって、間接的に測定する技術がいくつか開発された。軸箱加速度はその一つである。これをレール凹凸の検出・評価に用いる試みは国鉄時代から行われており⁵⁾、民営化以降の新幹線速度向上に合わせてその研究が深度化してきた⁹⁾。現在では、多くの軌道検測車で軸箱加速度も測定されている。同様に、レール凹凸上を走行する車両から発生する床下騒音を用いた評価方法も古くから用いられており、新幹線では国鉄時代から軌道検測車で床下騒音が測定されてきた。

一方で、軸箱加速度や床下騒音は車輪の凹凸や列車速度の影響を強く受けるため、データに再現性があるとは言えず、測定はされているものの、必ずしも実務には有効に活用されていないのが実状である。しかしながら、これらのデメリットを考慮しても、軸箱加速度や車内騒音は営業車両でも簡易に測定可能であり、かつ測定データに適切な処理を行えば、レール凹凸のみならず、レール支持状態（浮まくらぎの有無等）や輪重・横圧、転動音といった応答値を適切に把握できることから、今後さらなる活用が望まれる¹⁰⁾。鉄道総研では、可搬タイプの騒音計で営業車両の客室内床面騒音を測定し、レール凹凸を検出・評価するシステムを開発している¹¹⁾。また、日本大学と交通安全環境研究所の研究グループによっても、同種の装置が開発されている¹²⁾。



図3 メルメック社の Rail Corrugation Systems

(2) レール凹凸測定装置

本項では、軸箱加速度や床下騒音のような間接的な物理量ではなく、レール凹凸を直接測定する装置を扱う。ヨーロッパでは、EN13231-3¹³⁾ および EN15610¹⁴⁾ においてこのタイプの測定装置の基本仕様およびデータ処理方法が規格化されている。基本的な測定原理は、波長域は異なるものの図1のいずれかが用いられる。図3はイタリアのメルメック社が開発した RCS (Rail Corrugation Systems) と呼ばれる装置である。日光よけのすだれの内側に4組の光学式非接触変位計が設置され、偏心矢法でレール凹凸を測定する。ヨーロッパでは、これ以外にも様々なタイプのレール凹凸測定装置が商品化されており、転動音低減に向けた意欲が感じられる。

日本でも同種の装置は開発されており、鉄道総研でも偏心矢法によるトロリータイプの装置を開発している¹⁵⁾。偏心矢法を用いることで、ゲインが0となる波長帯が生じることを避けるとともに、センサ位置をレール断面方向に調整できる構造として、急曲線外軌ゲージコーナーに生じる波状摩耗のような、レール頭頂面中央以外の位置におけるレール凹凸波形の測定が可能となっている。

4. 軌道の常時監視

4.1 定置における軌道状態監視の意義

軌道は線路方向に途切れなく敷設されているため、その検査装置は専用車両、営業車両、保守用車またはトロリータイプに関わらず、線路方向に連続的に測定できるものが主体的に開発されてきた。一方、分岐器のように駅や車両基地にのみ敷設され、かつ構造が複雑で検査に労力を要する設備については、地上側に設置したセンサ類で劣化状態を常時監視できると、走行安全性の向上および検査コストの低減効果が大きい。本章では、鉄道総研が最近開発した、分岐器クロッシングのモニタリング技術2例、および定置モニタリングに関する海外の技術開発動向を紹介する。

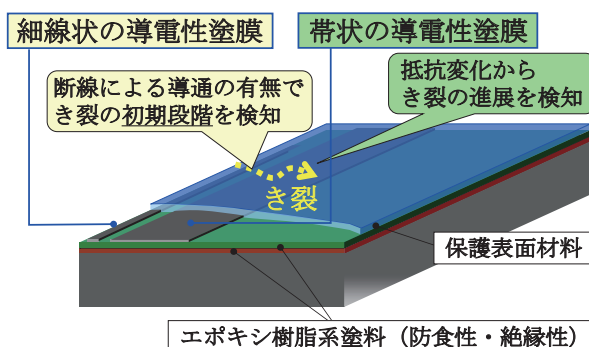


図4 導電性塗料によるき裂検知システム

4.2 ノーズ可動クロッシングの監視

高マンガン鋼製ノーズ可動クロッシングは鋳造品であり、鑄巣が存在するため超音波探傷による内部傷の検知が困難である。このため検査は、クロッシングを分解した上で目視または浸透探傷法によって行われており、多大な労力を要している。これに対し鉄道総研では、クロッシングに生じる疲労き裂の検知手法として、導電性塗料を用いた手法を開発した¹⁶⁾。

この手法の概要図を図4に示す。き裂の発生が見込まれる箇所に絶縁および防食を兼ねた厚膜型変性エポキシ樹脂塗料を塗布し、その上から線状および帯状の導電性塗料を塗布する。基材にき裂が発生すると、まず細線状の導電性塗膜が破断し、塗膜の電気抵抗が変化する。この変化を検出して、き裂の発生を検知する。さらに、基材のき裂が進むにつれて帯状の塗膜部の電気抵抗が徐々に変化する。これを検出して、き裂の進展を把握する。

現在、このシステムは営業線に試験敷設され¹⁷⁾、き裂検知の基本性能や、塗料の耐久性、他の保守作業への影響等を検証している。

一方、クロッシングには疲労き裂以外にも様々な損傷が発生する。特に固定クロッシングではウィングレール～ノーズレールの車輪乗り移り部で衝撃荷重による損傷が発生する。これに対し鉄道総研では、クロッシング各部で車両通過時の振動加速度を測定し、その振動レベルや卓越周波数の変化から損傷の発生・進展を検知する手法の開発を進めている¹⁸⁾。

図5に、固定クロッシングノーズ先端部付近軌間内側で測定した、車両の背向走行時におけるクロッシング振動加速度の1/3オクターブ周波数を示す。同図には新品の場合と、金属板で損傷を模擬した場合の結果を示す。この図から、損傷が発生すると卓越周波数が80Hzから1250Hzへと高い側に移動するとともに、振動レベルが10～30dBほど大きくなるのがわかる。本手法では、車輪の走行位置によって発生する振動加速度に違いが生じるため、測定データの処理には工夫が必要であるが、今後、このような点を解決した上で、クロッシングのモニタリング手法として完成させたいと考えている。

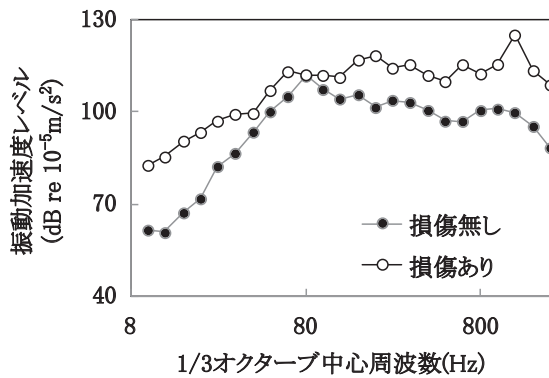


図5 クロッシングの振動加速度レベル（背向）

ヨーロッパにおいても分岐器のモニタリングについて様々な研究開発が行われている。例えば、EUで行われていた、軌道保守に関する技術開発プロジェクト INNOTRACK では、分岐器の故障検知システムの技術仕様が検討されている¹⁹⁾。この中では、転てつ機や鎖錠装置など、軌道部材以外のモニタリングについても、何をどのように測定すべきかが検討されるとともに、EU加盟国で実際に利用されているモニタリング装置が紹介されている。なお、報告書は Web 上で公開されている²⁰⁾。

5. おわりに

以上、軌道の検査・監視技術に関する最近の動向を簡単に紹介した。文中でもいくつか触れたが、ヨーロッパでは、軌道の検査に関わる規格を多数制定し、検査装置のようなハードウェアのみならず管理方法というソフトウェアも欧州基準を世界基準にしようとしている。

現在、日本では鉄道の海外進出が盛んにいわれているが、軌道の維持管理については国の省令・告示以外に統一的な基準・規格は無く、その内容も海外で広く認知されているとはいえない。一方、鉄道を輸出する際は、何らかの国際規格への準拠が求められることが多い。この場合、ISO や IEC の規格が無い事項については、ヨーロッパ以外の国であっても EN が国際規格に準じて適用されることが少なくない。したがって、今後の重要な課題として、2012 年に設定された ISO/TC269 などを通じて日本における軌道のメンテナンスの方法（ハード・ソフトとも）を国際規格化し、日本の軌道メンテナンス技術の輸出を側面から支援することが挙げられる。

なお、軌道の検査・監視技術については本稿で紹介した以外にも様々なものが開発されている。特に画像処理を用いた軌道部材の検査技術については、近年その発展が著しい。これらについては別の機会に紹介したい。

文献

- 1) 矢澤英治：軌道検出技術，RRR, Vol.70, No.5, pp.28-31, 2013
- 2) 竹下邦夫：偏心矢法による軌道狂い検出法，鉄道総研報告 Vol.4, No.10, pp.18-24, 1990
- 3) EN13848-5：Track geometry quality Part 5 -Geometric quality levels-, 2010.
- 4) EN13848-2：Track geometry quality Part 2 -Track recording vehicles-, 2010.
- 5) 佐藤吉彦，藤森聡二，竹下邦夫，服部登：HISTIM の開発と実用化，鉄道技術研究報告，No.1359, 1987
- 6) 竹下邦夫，矢澤英治：慣性正矢法による軌道狂い検出装置の開発，鉄道総研報告，Vol.14, No.4, pp.25-30, 2000
- 7) 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出装置の開発，鉄道総研報告，Vol.26, No.2, pp.7-12, 2012
- 8) 寺島令，佐藤陽：京浜東北線における営業列車使用の線路設備モニタリング走行試験，JREA, Vol.56 ,No.10, 2013
- 9) 須永陽一，井手寅三郎，金尾稔：軸箱加速度を活用した短波長軌道狂いの管理手法，鉄道総研報告 Vol.9, No.2, pp.35-40, 1995
- 10) 坪川洋友，水野真敏，芳賀昭弘，石田誠：台車前後軸での軸箱上下振動加速度を用いた軌道状態モニタリング手法，鉄道総研報告 Vol.27, No.4, pp.35-40, 2013
- 11) 田中博文，猿木雄三，清水惇，芳賀昭弘，福山幹康：車上測定による波状摩耗モニタリング手法，鉄道総研報告 Vol.24, No.12, pp.35-40, 2010
- 12) 網島均，松本陽，水間毅，中村英夫：プローブ車両による軌道の状態診断，営業車両による軌道状態の常時監視システムの開発，検査技術，Vol.12, No.5, 2007
- 13) EN13231-3：Track Acceptance of works – Part 3：Acceptance of rail grinding, milling and planing work in track, 2012.
- 14) EN15610：Noise emission – Rail roughness measurement related to rolling noise generation, 2009.
- 15) 田中博文，清水惇：効率的な波状摩耗管理のための可搬式レール凹凸連続測定装置の開発と活用法，鉄道工学シンポジウム論文集第 17 号，pp.19-26, 2013
- 16) 坂本達朗，栢田吉弘，細田充，吉野哲也：導電性塗料を用いたノーズ可動クロッシングのき裂検知の基礎検討，鉄道総研報告 Vol.26, No.12, pp.23-28, 2012
- 17) 國田洋平，本野貴志，柳谷勝：ノーズ可動クロッシング折損検知の現地検証，土木学会第 68 回年次学術講演会，VI -523, 2013
- 18) 清水紗希，及川祐也：クロッシング劣化状態監視手法の基礎研究，土木学会第 68 回年次学術講演会，VI -512, 2013
- 19) 例えば INNOTRACK Deliverable D3.3.1：List of key parameters for switch and crossing monitoring, 2008.
- 20) <http://www.innotrack.net/Reports>