

軌道状態のモニタリングに関する最近の研究開発

軌道技術研究部

部長 古川 敦

1. はじめに

軌道は列車の繰り返し走行や日照、降雨などによって状態が変化していくため、定期的なモニタリングが不可欠である。軌道のモニタリング装置としては、軌道検測車が古くから使われているが、近年では作業の効率化・高品質化を目指して新しい装置・システムが開発されている。

本発表では、このうち軌道変位やレール凹凸などの軌道形状および分岐器状態のモニタリングに関する、鉄道総研の最近の研究開発成果を紹介する¹⁾。

2. モニタリングを装置化する意義

モニタリングの装置化には様々な意義がある。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を測定することを考えれば、その意義は明らかである。(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変化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できる。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)はレールの内部傷やレール軸力のように、人間の目では直接測定する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、最終的な目的を常に考慮する必要がある。

3. 軌道形状のモニタリング

(1) 軌道変位検測

①軌道検測車

軌道形状のモニタリングのうち、いわゆる軌道変位（軌道狂い）の測定を、「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に示すいくつかの測定方法がある。日本では2次差分法的一种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。

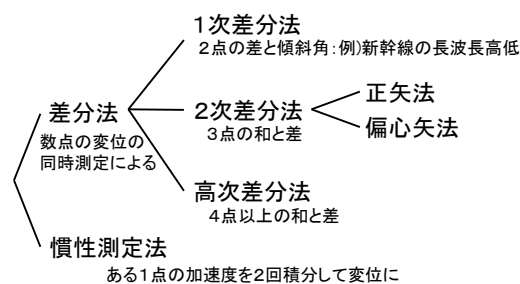


図1 高低・通り変位の測定方法

一方、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、新幹線の営業速度向上に伴って、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。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、測定原理は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。

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。

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。これにより、10m弦正矢法の波形が出力されるため、従来の軌道管理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。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、大きな改造を必要とせず一般の営業車への取り付けが可能である。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。



図2 慣性正矢軌道検測装置

②簡易な検測装置

JRおよび大手事業者は軌道検測車を所有しているが、副本線や側線は、運用の都合上、必ずしも軌道検測車による検測を行っていない。また中小事業者や路面電車では、軌道検測車自体を所有していない。このような事業者では、手押しタイプの簡易な検測装置が用いられている。鉄道総研でも、主として路面電車の併用軌道での使用を想定し、同種の装置を開発した。

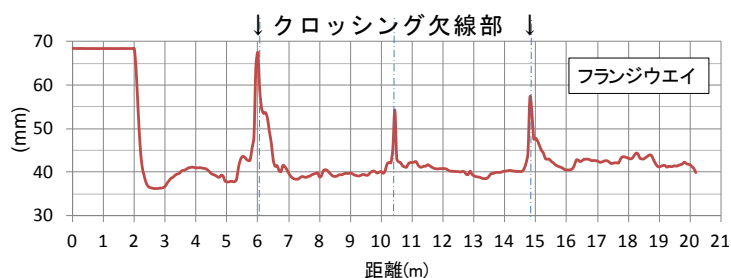


図3 路面電車用検測装置による検測波形の例

この装置のコンセプトは以下のとおりである。

- 軌間、水準、フランジウェイ幅、分岐器バックゲージを測定可能。
- 高低・通り変位測定は62.5cm弦とする。
- 徒歩(4km/h以下)による測定が可能。
- 最低2名での持ち運び、組み立て・分解等の取り扱いが可能。
- 軌道上に設置した時点で、測定開始可能。
- 半径20m以上の曲線で走行・測定可能。
- 道路面の不陸に対応し、軌間内においてレール面から高さ方向に40mmの空間を確保。
- 片トングレール構造の分岐器を走行・測定可能。

開発した装置による測定波形例を図3に示す。同図に示すように、路面電車の急曲線通過に重要となるフランジウェイ幅を連続的に測定できるのが本装置の特徴の一つである。

(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るため，間接的なモニタリング技術が開発されてきた。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，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。現在では，多くの軌道検測車で軸箱加速度が測定されている。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いる。

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，実務には必ずしも有効に活用されていない。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（浮きまくらぎの有無など）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。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。

② レール凹凸測定装置

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もいくつか実用化されている。ヨーロッパでは，EN13231-3 および EN15610 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。

鉄道総研では，偏心矢法によるトロリータイプの装置を開発している（図 4）。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。



図 4 レール凹凸測定装置

4. 分岐器の検査・モニタリング

(1) 導電性塗料によるクロッシングのき裂検知

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，鋳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モニタリング手法として，導電性塗料を用いたシステムを開発した。

このシステムの概要図を図 5 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、このシステムを営業線に試験敷設し、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などを検証している。

(2) 加速度によるクロッシング損傷のモニタリング

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、クロッシング各所で車両通過時の振動加速度を測定し、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。

図6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。

5. 今後の方向性

以上、軌道のモニタリング技術に関する最近の動向を簡単に紹介した。少子高齢化社会の到来を控え、本発表で紹介した以外にも様々なモニタリング装置の開発が各所で進められている。

冒頭のモニタリングの装置化の意義と照らし合わせると、今後の方向性として以下の事項が考えられる。

- (1) 作業効率向上：現在目視や打音で行われている検査の装置化。特に画像処理技術の活用。
- (2) 精度向上：レールやトングレール断面形状など、主として人力で行われている検査の装置化。
- (3) 頻度向上：装置の営業車への搭載および大量に取得されるデータの処理技術。
- (4) 機能向上：レール内部傷の非破壊検査、ロングレール軸力検査など。

特に営業車によるモニタリングと大規模データの処理は、今後のキーワードになると考えられる。鉄道総研におけるこれらの研究成果については、別の機会で紹介したい。

参考文献

- 1) 古川敦：軌道の検査・監視技術に関する最近の動向，鉄道総研報告，2014年6月号

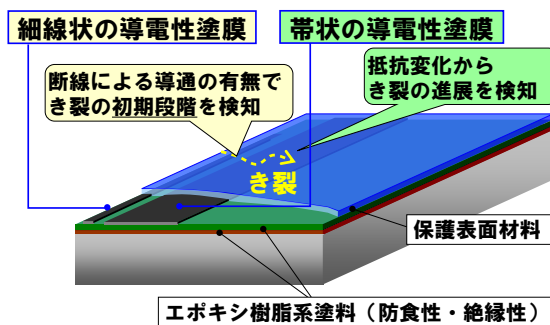


図5 導電性塗料によるき裂検知システム

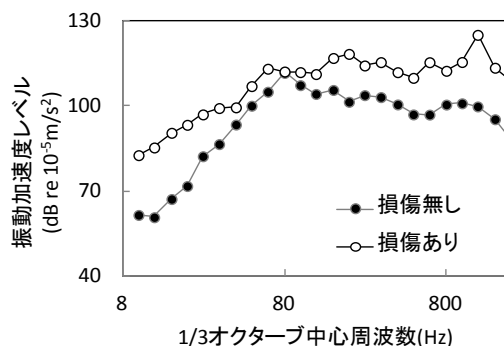


図6 クロッシングの振動加速度レベル（背向走行時）