

### 第93回

# 軌道検測手法と 検測精度の検証方法

## はじめに

バラスト軌道は、鉄道車両の繰り返し走行により、敷設された当初の状態から徐々に沈下、変形していきます。このような軌道のずれやゆがみを「軌道変位」もしくは「軌道狂い」といいます。軌道変位が大きくなると車両の走行安全性や乗り心地が悪化するため、

鉄道事業者は定期的に軌道変位を測定して状態を把握し、良好な軌道状態を維持するために軌道整備や材料交換を行っています。

軌道変位を測定することを「軌道検測」といい、一般的に図1に示す5項目(高低、通り、軌間、水準、平面性)が測定されています。高低と通りの検測手法は図2に示すように分類されま

す。図2の大きな分類のうち、「差分法」は水糸や車体などを弦として、弦とレールとの離れを何点か測定して軌道変位を算出する方法であり、「慣性測定法」は加速度の2回積分が変位となるという物理の法則を利用して軌道変位を算出する方法です。

以下では、これまでに開発されてきた軌道検測手法および装置と、現在使

用されている軌道検測車および軌道検測装置の検測精度の検証方法について紹介いたします。

## 人手による軌道検測

軌道変位を簡易に測定する方法は人手によるもので、旧来から現在まで多くの鉄道事業者で行われています。高低と通りについては、図3に示すように、レール長手方向に対して一定の長さ(弦長)を持った水糸を張り、糸の midpoint での糸とレールの離れ(正矢)を測定する方法が用いられています<sup>1)</sup>。このとき、高低と通りの検測では、一般的に、弦長を10mとする「10m弦正矢法」が用いられています。また、軌間と水準については、図4に示す標準

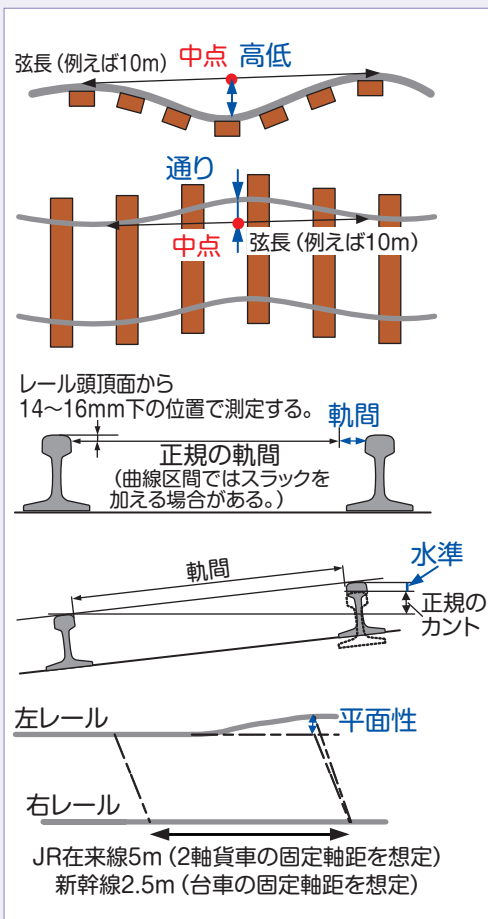


図1 軌道変位の測定項目

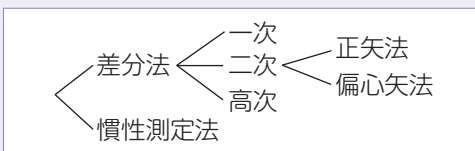


図2 高低と通りの検測手法の分類



図3 水糸による軌道検測の状況 (高低・通り)

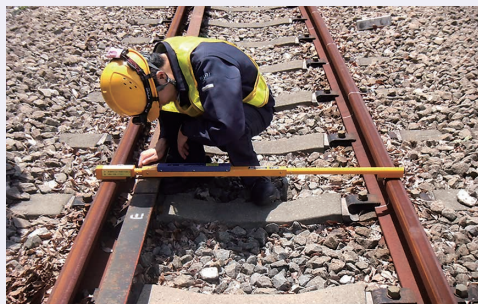


図4 標準ゲージによる軌道検測の状況 (軌間・水準)

ゲージとよばれる水準器  
つきの検測器具を用いて  
測定が行われています。

しかしながら、長い距離の軌道を検測する際には、人手による軌道検測では多大な時間と労力が必要になります。そこで、軌道検測を効率化するために、「可搬式の軌道検測装置」や「軌道検測車」が開発されてきました。

### 可搬式の軌道検測装置

図5に可搬式の軌道検測装置の例として、(株)

カネコ製のトラックマスターと鉄道総研が開発した簡易型軌道検測装置(EMAS)<sup>2)</sup>を示します。トラックマスターは、後述する軌道検測車を所有していない鉄道事業者の線区や、軌道検測車が走行しない区間の軌道検測を効率化することを目的として、1989年に開発されました。また、EMASは路面電車もターゲットとして、2014年に実用化されました。なお、可搬式の軌道検測装置としては、これら以外のものも使用されています。

可搬式の軌道検測装置では、2本のレールの幅を測定する二つの変位センサーと装置に内蔵されている傾きを測定するセンサーにより軌間と水準を測定しています。また、基準となるビームの中央に搭載されている変位センサーにより、ビームとレールの離れを測定して、ビームの長さを弦長(2m,1mなど)とする高低と通りを測定しています。10m弦の高低および通りは、前後数点の測定結果を測定したい位置からの距離に応じた係数を乗じて足し合わせる倍長演算により算出されます。

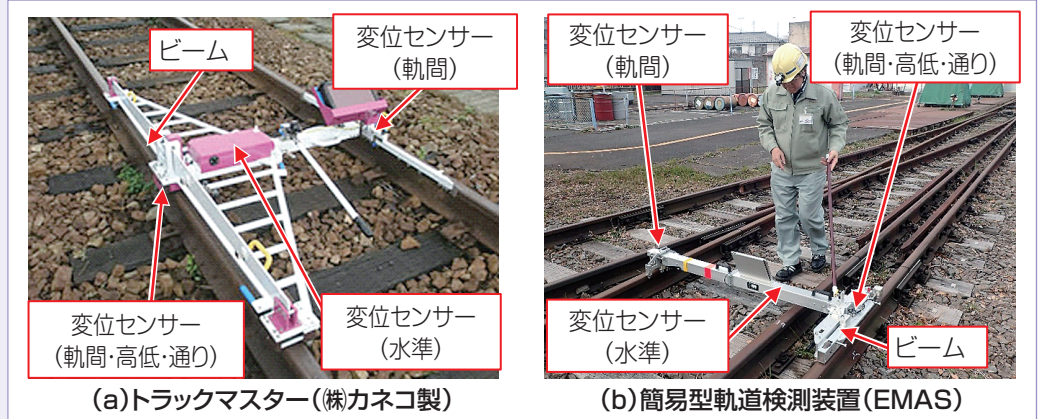


図5 可搬型の軌道検測装置の例

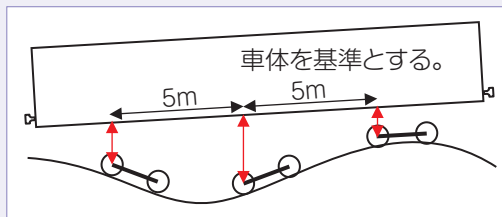


図6 3台車の軌道検測車による軌道検測

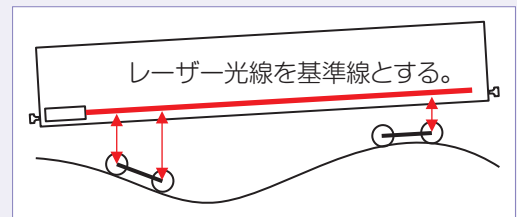


図7 2台車の軌道検測車による軌道検測

ただし、高低と通りについては、ビームと変位センサーが搭載されている側(基準側)のみを測定しており、反対側のレールの高低は基準側の高低、軌間、水準から、通りは基準側の通りと軌間から算出されます。ただし、可搬式の軌道検測装置では、車両の荷重が作用した状態での軌道変位は測定できません。

### 差分法による軌道検測車

車両走行時の荷重が作用した状態における軌道変位を把握することを目的とした軌道検測車の開発は、旧国鉄で1920年代から開始されましたが、剛性の高い車体を基準とした10m弦正矢法による本格的な3台車軌道検測車(図6)の開発は1953年頃から開始され、1959年にマヤ34形高速軌道検測車として在来線で実用化されました。新幹線では、このマヤ34形をもとにした軌道検測車921-1形に続き、1975年には非接触の光学式レール変位検出装置を搭載したドクターイエ

ロー(921-11号車)が開発されましたが、曲線を高速で走行する場合、中間の台車が不安定となり、高速化に対応できないという課題が生まれました。

この課題を解決するために、偏心矢法を用いた2台車の軌道検測車が開発され、1997年に実用化されました。営業車と同じ仕様の車体を有する2台車の軌道検測車は、剛性が低く車体を基準とすることができません。そこで、2台車の軌道検測車による高低と通りの検測では、図7に示すように、車体内に通したレーザー光線を基準線としています。2台車の軌道検測車による高低と通りの検測では4軸で基準線に対するレールの鉛直方向および水平方向の変位を測定し、うち3軸の測定結果を用いて、デジタルフィルター処理により10m弦正矢法の波形を算出しています。ここで、レールの鉛直方向の変位は測定用の車輪の動きにより測定しています。一方で、レールの水平方向の変位は、軌道検測車が開発された当初は、測定車輪の動きを測定していましたが、現在ではおもにレーザー

や渦電流を用いた非接触式の変位センサーが用いられています。また、水準の検測のための傾きを測定するセンサーは、軌道検測車が開発された当初は、コマの回転により姿勢を測定する機械式ジャイロが用いられていましたが、現在ではおもに光の周波数の差を利用して回転を検出する光学式ジャイロが用いられています。

なお、軌道検測車に用いられている要素技術の詳細については、RRR 2013年5月号の来し方行く末「軌道検測技術」に記載があります。

## 慣性測定法による軌道検測装置

差分法による軌道検測車の改良と並行して、慣性測定法による軌道検測技術の開発が1960年代から行われ、1974年に慣性測定法で高低変位を

測定するHLSTIMが製作されました。慣性測定法による軌道検測では、加速度計を車体または台車に取り付けて測定される加速度の2回積分を行います。ここで、軌道の形状はさまざまな波長の波の重ね合わせで表現されますが、軌道変位は測定的手法により、データが含んでいる各波長の波の大きさは実際の軌道の形状とは異なって求められ、その比を検測倍率といいます。加速度を2回積分する場合、長い波長ではこの倍率が大きくなる特性であるため、加速度の信号とノイズを区別できなくなり、大きなゆがみとなって波形に表れます。一方で、10m弦正矢法は、長い波長で2回積分により大きくなる検測倍率をちょうど打ち消すように倍率が小さくなる特性をもっています。そこで、図8に示すようにこれらの二つの特性を合わせることで、加速度の2回積分から長い波長でゆがみを

生じない10m弦正矢法の波形を得ることができます。これが「慣性正矢法」の原理で、線路の管理に適合した手法となっています。

慣性正矢法を用いた軌道検測装置は2009年に実用化されました。図9に慣性正矢法を用いた軌道検測装置による軌道検測のイメージを示します。この軌道検測装置には、同一断面上に変位センサーと加速度計が内蔵されており、加速度を2回積分することで、装置本体の移動の軌跡を得ることができ、これに変位センサーで測定した装置とレールとの距離を足し合わせることで、10m弦の軌道変位の検測を行うことができます。このため、慣性正矢法を用いた軌道検測装置は、非常にコンパクトになり、図10のように、営業車に搭載することができ、軌道検測データを高頻度で取得することができます<sup>3)</sup>。

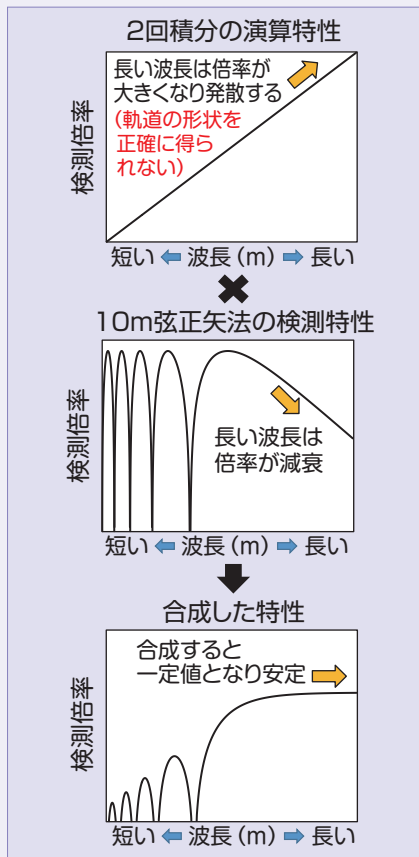


図8 慣性正矢法の検測特性

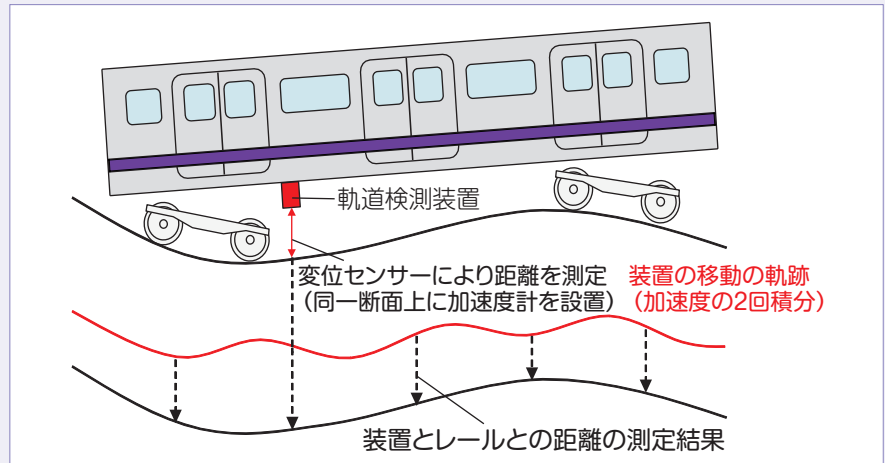


図9 慣性正矢法を用いた軌道検測装置による軌道検測のイメージ

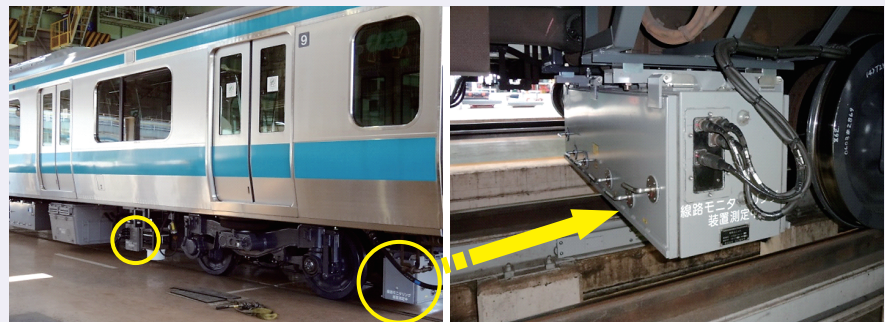


図10 営業車に搭載された慣性正矢軌道検測装置

表1 軌道検測車に求められる精度  
(標準偏差による評価)

	在来線	新幹線
10m 弦高低	0.5mm	0.3mm
10m 弦通り	0.5mm	0.3mm
軌間	0.5mm	0.3mm
水準	1.0mm	0.5mm
平面性	1.0mm	0.5mm

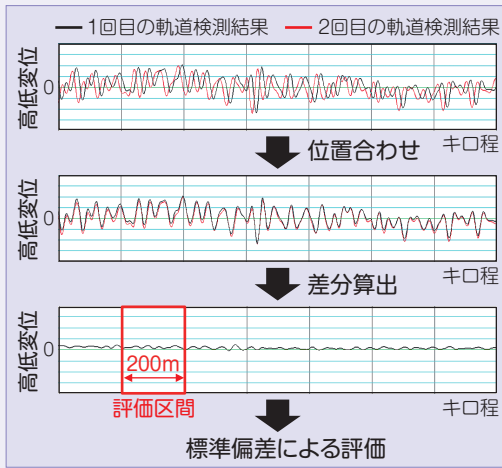


図11 検測精度の検証のフロー

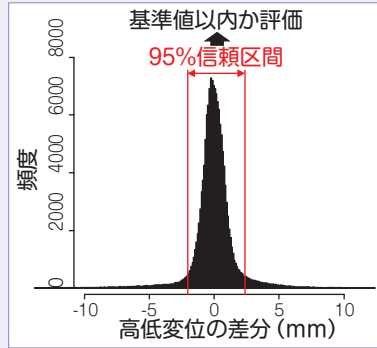


図12 95%信頼区間の値による  
評価方法 (EN 13848-2)

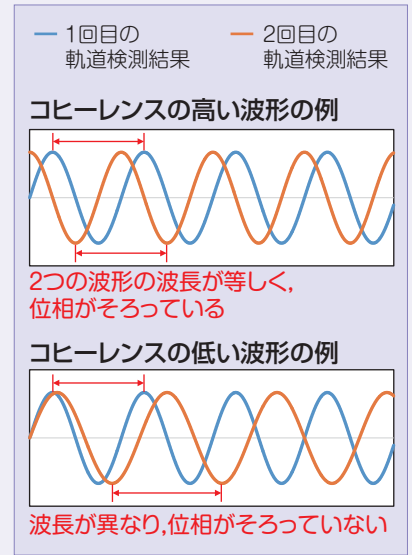


図13 コヒーレンスのイメージ

## 検測精度の検証方法

軌道は非常に延長が長いので、軌道検測では絶対線形ではなく、差分法などによる相対的な値を測定しています。このため、検測精度の評価には、「再現性」と「整合性」という二つの指標が用いられています。再現性は、同じ区間を複数回測定して得られた測定結果の差の標準偏差によるもので、この値が小さいほど、繰り返し行った検測結果のばらつきが小さいといえます。整合性は、既存の軌道検測装置などによる測定結果との差の標準偏差によるもので、この値が小さいほど、既存の装置と比較した場合の検測結果の差が小さいといえます。

新しい軌道検測装置などを導入する際には、再現性と整合性の目標値を満たしているかどうか検証を行う必要があります。図11に検測精度の検証のフローを示します。まず、軌道検測を2回行い、位置合わせを行った上で、2回の検測結果の差分を算出します。そして、一定の長さの区間(たとえば200m)に分割して、区間ごとに差分の標準偏差により評価を行います。ここで、位置合わせには、従来は測定結果を一点ずつずらして波形をだまかに一致させる

方法が用いられていましたが、現在では2つの波形間の相関係数を算出して高精度に位置合わせを行う相互相関法などが用いられています<sup>4)</sup>。表1に在来線および新幹線の軌道検測車に求められる再現性と整合性について、現在使用されている目標値を示します。

また、EN規格 (EN13848-2) では、検測精度の評価方法として、一定の区間ごとの検測結果の差の標準偏差に加えて、検測結果の差の分布の95%信頼区間の値を算出して基準値以内か確認することで、再現性および整合性の評価 (図12) を行っています。また、位相のそろい具合であるコヒーレンス (図13) などを用いた評価についても記載があります。今後は、このような方法も参考として、軌道検測技術に即した検測精度の評価方法を確立することが望まれています。

## おわりに

軌道変位を測定するための軌道検測手法と検測精度の検証方法について紹介しました。軌道検測結果を確認する際には、どのような原理の軌道検測手

法によるものなのか、また検測結果に影響する要素には何があるのか理解しておくことが大切です。

鉄道総研では、軌道保守作業の効率化のため、コストや労力のかからない軌道検測技術などの開発<sup>5)</sup>にも取り組んでいます。また、海外で用いられている方法なども参考として、軌道検測精度の評価方法の体系化を行いたいと考えています。

(石川智行/軌道技術研究部  
軌道管理研究室)

## 文献

- 1) 鉄道総合技術研究所鉄道技術推進センター：鉄道構造物等維持管理標準 (軌道編) の手引き, 鉄道総合技術研究所, 2007
- 2) 清水惇, 矢澤英治：簡易型軌道検測装置の性能評価, 日本鉄道施設協会誌, Vol. 51, No. 9, pp. 26-30, 2013
- 3) 三和雅史, 矢澤英治, 佐野弘典, 山口剛志：高頻度の検測で軌道の状態変化を診る, RRR, Vol. 73, No. 2, pp. 12-15, 2016
- 4) 田中博文, 山本修平, 大島崇史, 森忠夫, 西藤安隆：相互相関法を応用した高頻度軌道検測データによる急進把握手法の開発, 鉄道工学シンポジウム論文集, No. 21, pp. 1-8, 2017
- 5) 坪川洋友, 石川智行, 塩野幸策：保守用車に搭載可能な動的軌間・平面性測定装置の開発, 鉄道総研報告, Vol. 31, No. 12, pp. 47-52, 2017