

# 慣性正矢法による軌道検測装置の開発

軌道技術研究部 軌道管理研究室

副主任研究員 坪川洋友

## 1. はじめに

鉄道総研では、検測軸1軸で測定可能な慣性測定法に正矢法の特性を組み合わせて、従来から利用されている正矢法の波形を出力できる、慣性正矢法を用いた軌道検測装置の開発を進めてきた<sup>1)</sup>。すでに台車装架型装置については実用化し、2009年8月から九州新幹線800系1000番台に搭載されている<sup>2)</sup>。一方、同装置を車体の床下に設置したいという要請を受け、車体装架型装置の試作機を製作し、JR東日本の在来線試験電車で搭載して検測精度と長期耐久性の検証を行った。ここでは、装置の開発経緯と、装置による検測波形の再現性および現行軌道検測車との整合性を検証した結果について報告する。

## 2. 慣性正矢軌道検測装置の概要

### 2.1 慣性正矢法の測定原理

慣性測定法は、加速度の2回積分が変位になるという物理の基本原理を利用して物体の位置を知る方法であり、車両に設置した装置で測定した加速度から装置の位置を求め、さらに装置からレールまでの相対変位を測定して加算したものが軌道の形状となる。しかし、慣性測定法における加速度の2回積分の周波数特性は図1(a)に示すように、周波数0でゲインが無限大となるため演算が不安定となる。そのため、フィルタ処理によって倍率を制限するが、フィルタ回路の位相特性の影響により波形がひずむ現象が発生する。一方、10m弦正矢法の検測特性は図1(b)に示すように低周波域で減衰するが、その減衰の勾配は2回積分の低周波域での増加の勾配に等しい。そこで、両者を合成した図1(c)の特

性で加速度を処理すれば、周波数0でのゲインが有限の値となり、安定した演算を行うことが可能になるとともに、その出力は、多くの鉄道事業者で利用されている正矢法の波形となる。このように慣性測定法の原理を用い、かつ正矢法の波形が得られる本原理を「慣性正矢法」という。

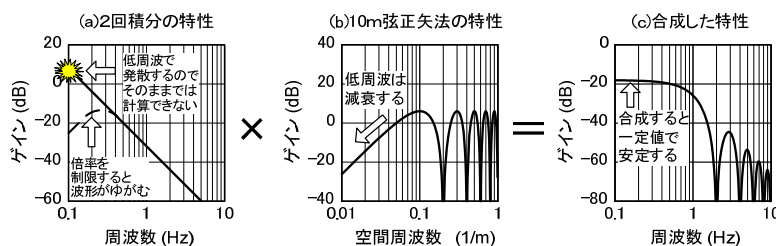


図1 慣性正矢法の測定原理

### 2.2 慣性正矢軌道検測装置製作のコンセプト

慣性正矢軌道検測装置の製作のコンセプトは以下のとおりである。

- (1) 慣性測定による1断面のみでの検測が可能で、可能な限り低価格の装置とする。
- (2) 検測ユニットは、営業列車での設置を念頭に、台車枠または車体床下への設置が可能な寸法・重量とする。
- (3) 車両への取付け、取外しが容易な構造とし、車両取付け後の機器調整は不要とする。
- (4) 無人収録を前提に、検測ユニット、演算装置とも測定前の微調整を不要とし、電源投入と

ヒートランだけで使える安定した性能を確保する。

## 2. 3 慣性正矢軌道検出装置の構成

本装置は、光ファイバジャイロ、加速度計、2軸レール変位検出装置および演算回路を一体として組み込んだ検出ユニット、制御ユニット、データ処理・収録用パソコン、電源で構成されている。本装置には台車装架型と車体装架型があり、検出ユニットは取付箇所に応じて2種類開発した。図2では車体装架型装置の検出ユニットの構成と取付状況を示す。検出ユニットの寸法は、幅1440mm、高さ445mm、奥行き320mmであり、重量は約170kgである。

## 2. 4 2軸レール変位検出装置

検出ユニットを台車枠や車体床下に取付けてレールとの相対変位を求めるには、上下変位が生じてでもレールを追尾可能なレール変位計が必要である。このために開発したのが図3に示す2軸レール変位検出装置である。この装置は、2つの変位計の出力と2つの反射鏡の角度から、三角形の閉合計算によって、レールと変位計との相対変位を算出する。そして、列車の進行によるレールと変位計との相対位置の変化にあわせて、反射鏡の角度を自動的に調整してレーザーがレールを追尾するように制御している。

2軸レール変位検出装置の測定範囲を図4に示す。台車装架型の場合は、軸ばねのストロークに対応するもの(上下+50mm、-35mm・左右+75mm、-50mm)である。しかし、車体装架型の場合は、更に空気ばねのストロークや曲線部での車体偏倚が加わるため、台車装架型装置に比べてレールとの相対変位の測定範囲を広くする必要があり、レーザーの光路長は約1.4倍、測定範囲は上下左右とも約2倍(上下±100mm・左右±150mm)へと拡大している。また、測定範囲の拡大により、測定範囲内に踏切板、脱線防止ガード、レール近傍の雑草等、レール以外の物体を誤検出する可能性があるが、レールの追尾動作の途中でレーザー光の照射対象がレール頭部か否かの形状判定を行うようにしている。

## 3. 営業線における試験検出結果

### 3. 1 試験検出の概要

車体装架型装置をJR東日本の在来線試験電車に搭載し、営業線での検出精度および長期耐久性の検証を実施した。なお、2009年1月の搭載から、2011年7月の撤去までの検出走行距離は約

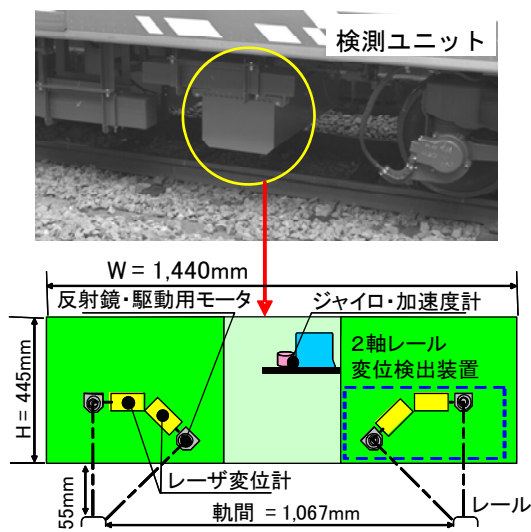


図2 検出ユニットの構成と取付状況

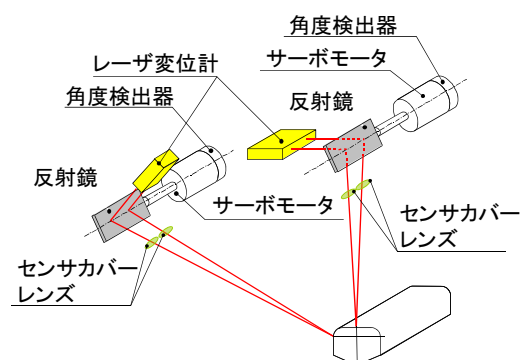


図3 2軸レール変位検出装置の構造

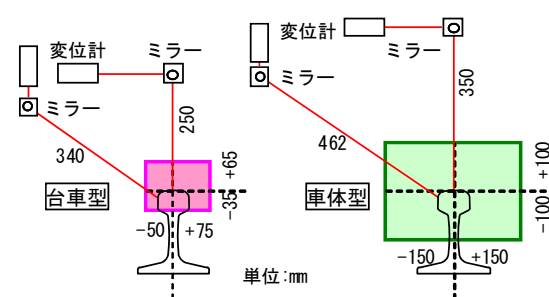


図4 2軸レール変位検出装置の光路長と測定範囲

18,000km, 装置電源非投入での回送を含めると約21,500kmの走行となったが、本装置に大きな不具合は発生せず、おおむね順調に試験を終えた。

### 3.2 繰返し測定による再現性の検証

本装置の曲線区間の通りの検測は、カント等による加速度計の傾きを補正して求められた定常加速度を用いるため、勾配と曲線が重畳する区間はジャイロの特性上、装置の精度確保が不利な条件となる。図5は、約10‰の下り勾配中で、平面曲線が短距離で右-左-右と変化する区間を3日間で9回測定した結果を対象として、装置の再現性を確認したものである。図中の $\sigma$ は、最上段の波形を基準とした場合の各波形の再現性誤差を標準偏差で示した値である。誤差は標準偏差にして10m弦高低では0.3mm以下、また10m弦通りでは0.5mm以下となり、在来線用の軌道検測装置として十分な再現性を得ていることが確認された。なお、速度によって再現性が変化することはない、少なくとも速度40km/h以上では安定している。

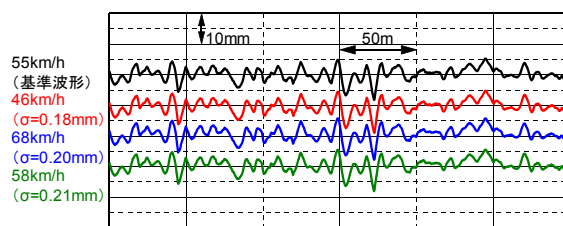
### 3.3 現行軌道検測車との整合性の検証

次に、現行軌道検測車による測定結果と本装置による測定結果の整合性を検証した。本装置での測定は、軌道検測車の測定から3日後の値で、両者の測定速度は約60km/hでほぼ同一である。なお、この間に保守作業等の投入はない。

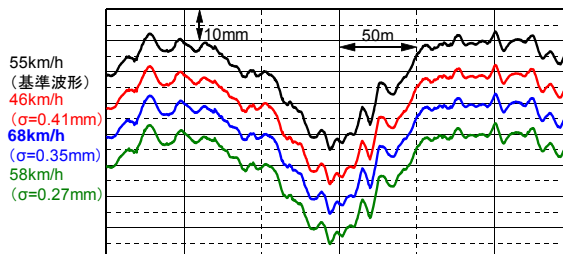
図6より、10m弦高低では、本装置と軌道検測車の波形は精度良く一致している。また10m弦通りでは、両者の波形はおおむね一致しているが、細部に違いは見られる。本装置が2.4節のとおりレール頭側面の一定位置を検出するのに対して、現行軌道検測車はレール変位検出装置が軸箱に吊られ、そこから一定高さ下を測定しているため、車輪の踏面勾配による軸箱の上下変化によりレール頭側面の検出高さが増減する。特に摩耗レールでの検出高さの変化が、両者の波形の違いにつながっている。このことを考慮すれば、本装置は高低変位、通り変位ともに、現行の軌道検測車と整合性のある測定結果が得られていると言える。

### 4. 低速時の検測精度補償手法の検討

慣性測定法は加速度の積分を行うことから、加速度とノイズの大きさの差が小さくなる低速時には精度が低下する問題があり、時速約20km/h以上の精度を保証するに留まってきた。しかし、今後の営業車によるモニタリングシステムとしての利用を考えると、検測下限速度を可能な限り引き下げることが望ましい。そこで、図7のように、レール変位検出装置をもう1組車体に搭載

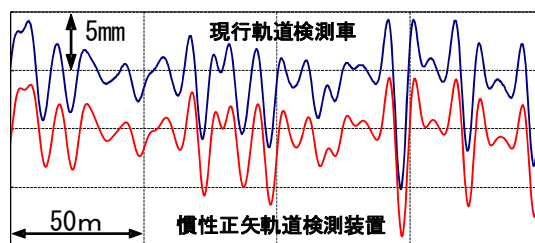


(a) 10m弦高低

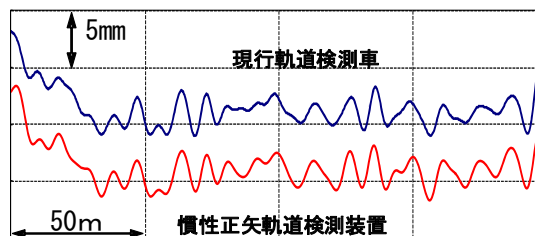


(b) 10m弦通り

図5 慣性正矢装置の再現性



(a) 10m弦高低



(b) 10m弦通り (曲線部)

図6 慣性正矢装置と現行軌道検測車の整合性

し、停止状態から測定を可能にする手法を検討した。これは検測装置内蔵のジャイロ信号と、2組の変位検出装置の出力から、高低は1次差分、通りは検出装置間隔での2回の測定結果の2次差分によって低速時の検測を行うものである。この方法では、車体を2組のレール変位検出装置の測定基準として用いることになるため、走行中の車体の変形が大きいと検測精度に影響を及ぼす。したがって、本手法の適用は、慣性測定のバックアップとして、車体の変形が小さな低速走行時の検測に限られる。

ここでは、現行軌道検測車のセンサの設置間隔と、差分法から10m弦正矢へ変換する際の振幅特性を考慮して、新幹線用軌道検測車のセンサ出力を元に、差分法から10m弦正矢へ変換した波形と、同検測車の偏心矢測定系から10m弦正矢へ変換した波形とを比較した。結果を図8に示す。10m弦高低では、両者の波形は良く一致している。一方、10m弦通りでは、曲線部の波形に若干の相違点が見られるが、これは前節で述べたレール変位検出装置のレール検出高さ変化の影響であり、レール頭側部の摩耗が小さい直線部での整合性は十分である。

また、検測速度と両者の波形の整合性誤差との関係を検証した結果、10m弦高低では速度約50km/h以下、10m弦通りでは上述の摩耗レールの測定値のばらつきに起因すると考えられるものを除くと、速度約50km/h以下で新幹線の精度目標である標準偏差0.3mm以下を満足した。したがって、実際に検測車を構成する場合には、この速度までに慣性測定に切り替えることで、停止状態から最高速度まで十分な精度を有した検測が可能となる。

## 5. おわりに

慣性正矢軌道検測装置については、台車装架型については既に実用化し、車体装架型は在来線の軌道検測装置として十分な検測精度を得ていることを明らかにした。また、低速時の検測精度を補償する手法を検討し、実用上問題ないことを確認した。今後は、JR東日本での実用先行機の製作協力をとおして、実用化につなげたいと考えている。

最後に、車体装架型装置の営業線における試験検測を実施するにあたり、ご協力頂きましたJR東日本テクニカルセンターおよび先端鉄道システム開発センターの皆様に深謝いたします。

### [参考文献]

- 1) 竹下邦夫, 矢澤英治: 慣性正矢法による軌道狂い検測装置の開発, 鉄道総研報告, Vol. 14, No. 4, pp. 25-30, 2000. 4
- 2) 坪川洋友, 矢澤英治, 森高寛功: 慣性正矢法を用いた営業車による軌道検測, 第15回鉄道技術・政策連合シンポジウム, 2008. 12

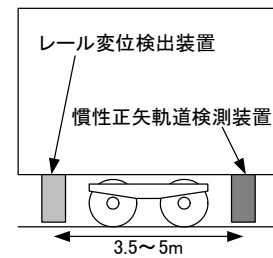
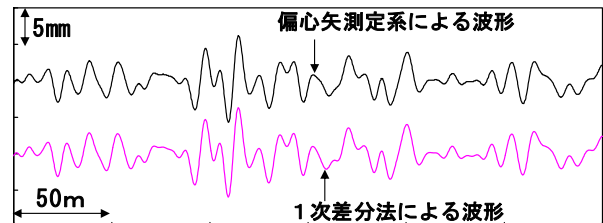
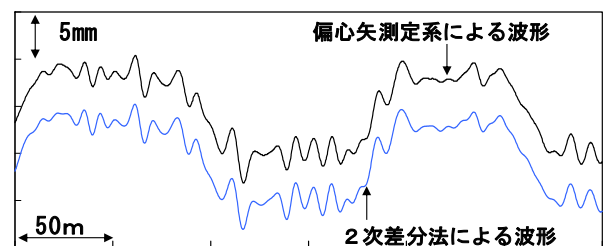


図7 変位検出装置の付加イメージ



(a) 10m弦高低



(b) 10m弦通り

図8 レール変位検出装置を付加した補償手法