

1513 車体装架型慣性正矢軌道検測装置の試験検測

正 [土] ○南木 聡明 正 [土] 矢澤 英治 ((財) 鉄道総合技術研究所)

正 [土] 松田 博之 (東日本旅客鉄道株式会社)

Test measurements of track irregularity using body-mounted device to use the inertial mid-chord offset method

○Toshiaki Nanmoku, Eiji Yazawa Railway Technical Research Institute

2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji, Tokyo

Hiroyuki Matsuda East Japan Railway Company

We have developed a measuring method combined the characteristics of the inertial measuring method and mid-chord offset method. By previous researches and tests by commercial lines, we acquired measurement accuracy sufficient for practical use about a bogie-mounted device to use the inertial mid-chord offset method. On the other hand, receiving the request of wanting to install a device to use the inertial mid-chord offset method under carbody, we have done research which extends a time base range and acquired measurement accuracy sufficient for practical use by last year. This paper describes the outline of a body-mounted device to use the inertial mid-chord offset method and the results of test measurements on commercial lines using that device.

Keywords: Track measurement, Inertial mid-chord offset method, Two-axis rail displacement sensor, Measurement accuracy

1. はじめに

鉄道総研では、慣性測定法に正矢法の演算を組み合わせた軌道検測装置の開発を進めてきた。これまでの研究および営業線での試験検測により、台車装架型(車両の台車枠に設置)については実用可能な測定精度と再現性を得ることができ¹⁾、九州新幹線において、台車装架型装置が実稼動を開始しようとしている²⁾。

一方、同装置を車体装架(車体の床下に設置)したいという要請を受け、これまでに測定範囲を拡大する研究を行ってきた³⁾。その結果、昨年までに室内試験ではほぼ実用可能な測定精度を得ることができたが、実際の測定において十分な精度が得られるかについては、実装置による検証が必要であった。

本年1月より、車体装架型装置を東日本旅客鉄道株式会社(以下、JR東日本)の在来線試験電車(MUE-Train)に設置し、営業線での試験検測を継続的に実施している⁴⁾。本稿では、車体装架型装置の概要および営業線における試験検測の結果について報告する。

2. 慣性正矢法の検測原理⁵⁾

慣性正矢法は、図1(a)に示すように、慣性測定法の欠点であった低周波の2回積分が発散する現象、あるいはそれを防止するためにフィルター処理を行うことで波形がゆがむ現象を、波形処理時に正矢法の検測特性を組み合わせることで解決した測定法である。

加速度の2回積分の周波数特性は、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。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で減衰するが、その減衰のこう配は2回積分の低周波域での増加のこう配に等しい。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。

3. 台車装架型と車体装架型の特徴

表1は、慣性正矢測定装置の装架箇所別の特徴を整理したものである。車体装架型は、台車装架型と比較し、振動環境が有利である、また寸法上の制約が比較的少ないため、搭載可能な車両の選択範囲が広いという長所がある。その一方、測定範囲が広範囲になるため、結果として欠線部のダウンタイムが長く、欠線部の通過直後一度レールを見失った後、ガードレール等のレール以外の設備を誤認識する可能性がある。

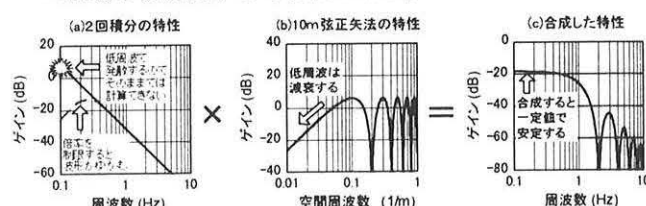


図1 慣性正矢法の検測原理

表1 装架箇所による特徴

	長 所	短 所
台車	○レール以外の物体が測定範囲に入りにくい(欠線部のダウンタイム短)	×ジャイロの精度確保のため除振が必要 ×寸法上取付困難な台車あり
車体	○除振は不要 ○搭載可能な車両を比較的容易に選択可能	×レール以外の物体が測定範囲に入りやすい(欠線部のダウンタイム長)

4. 車体装架型慣性正矢軌道検出装置の概要

J R 東日本の在来線試験電車で搭載するための車体装架型装置を製作した。以下、製作のコンセプト、装置の構成、および装置の特徴的な構成部品である2軸レール変位検出装置について説明する。

4.1 製作のコンセプト

今回の装置の製作のコンセプトは以下のとおりである。

- ・将来の営業列車への設置を念頭に、床下への設置が可能な寸法、重量とする
- ・軌道検測車の基本的な測定項目（軌間、通り、高低、水準、平面性）をすべて測定する
- ・取付けおよび取外しを容易にする

これらを元に、本装置は車上装置を必要最小限とし、将来営業車の一角に搭載可能な構成としている。また、床下装置は測定上可能な限りレール面からの離隔をとることとした。

4.2 装置の構成

本装置は、検出ユニット（床下）、制御ユニット、データ処理・収録用パソコン、電源（以上、床上）で構成されている。検出ユニットの具体的な構成を図2に示す。検出ユニットの寸法は、幅（レール直角方向） $W=1,440\text{mm}$ 、高さ $H=445\text{mm}$ 、奥行き（レール長手方向） $B=320\text{mm}$ であり、重量は約170kgである。検出ユニットの内部には、加速度計、光ファイバージャイロ、2軸レール変位検出装置、および演算回路が内蔵されている。また、検出ユニットからのデータは、電気的なノイズの影響を受けない光ファイバケーブルにより床上の制御ユニットに伝送される構成となっている。

4.3 2軸レール変位検出装置

本装置の特徴的な構成部品に2軸レール変位検出装置がある。この装置の構成を図3に示す。本装置は、ミラーの角度を変えることにより、変位計からのレーザーの照査方向を変化させ、上下方向はレール頭頂面の中央を、左右方向はレール頭側部の一定位置を追尾するものである。この2方向から照射するレーザーの測長結果と、2つのミラーの角度から、三角形の閉合計算によりレールと装置との相対変位を算出している。そして、列車の進行により、装置とレールとの相対位置が変化すると、レーザー変位計の出力が変化し、三角形が閉合しなくなる。そこで、再び三角形が閉合するまでミラーの角度を変更し、レーザーがレールを追尾するよう制御する。本装置では、この演算を1ミリ秒に1回繰り返している。

また、図4に示すとおり、台車装架型では、ミラーと

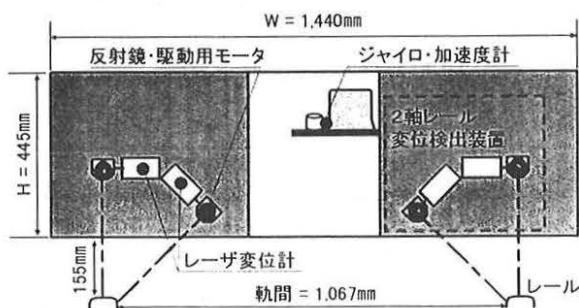


図2 検出ユニットの構成（レール位置:原点）

レール間のレーザーの光路長および測定範囲は軸ばねのストロークに対応する範囲であった。しかし、車体装架型では、更に空気ばねのストロークや車体の偏心が加わるため、レーザーの光路長は約1.4倍に、測定範囲は上下左右に約2倍ずつ拡大する必要があった。レーザーの光路長が長くなると、ミラーのゆがみによる誤差は拡大し、検測精度に繋がる。そのため、測定範囲を拡大した場合でも検測精度を維持するためには、温度変化によるミラーのゆがみを抑える必要があった。そこで、本装置の2軸レール変位検出装置には、温度変化によるひずみを生じない高精度ミラーを用い、検測精度の向上を図っている³⁾。

5. 営業線における試験検測の結果

5.1 試験検測の概要

前述のとおり、J R 東日本の試験電車で車体装架型装置を設置し、2009年1月下旬以降、首都圏の主要線区を走行し、営業線での検測精度および長期耐久性の検証を実施している。図5は試験電車および装置の設置状態を示したものである。

試験電車は7両編成であり、本装置は、図5に示すとおり7号車の6号車側の台車の近傍に設置されている。また、試験電車への設置に際しては、飛散物からの保護のため、検出ユニットを覆うように保護カバーを設置している。2009年9月末現在、延べ走行距離は約8,500km（回送は除く）になるが、装置に特出した不具合は発生しておらず、順調に測定を行っている。

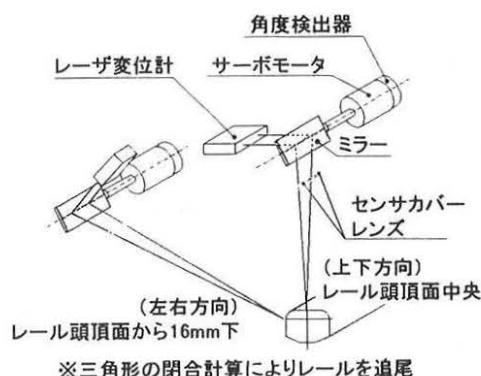


図3 2軸レール変位検出装置の構成

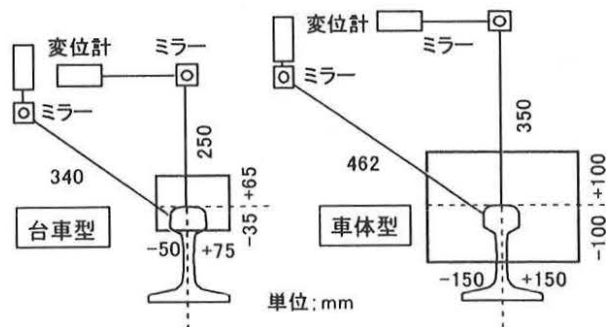


図4 2軸レール変位検出装置の光路長と測定範囲

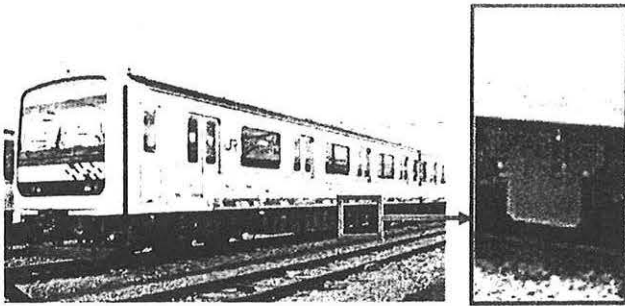


図5 試験電車および装置の設置状態

5.2 繰返し測定時の再現性の精度

試験検測における繰返し測定時の再現性誤差は、既に報告したとおり、単曲線について実用上一定の精度が得られることを確認している。

本報告では、約10‰の下りこう配で平面曲線が右左右に変化する区間を3日間で9回測定した結果から、より複雑な線形に対する再現性の精度を検証する。図6は、その結果を示したものであり、(a)は10m弦高低の、(b)は10m弦通りの結果である。ここに、図中の σ 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の標準偏差を示した数値である。なお、繰返し測定時の再現性誤差の標準偏差は、新幹線では0.3mm以内、在来線では0.5mm以内を目標としている。そのため、軌道検測では、0.1mm単位の精度、0.01mm単位の分解能が必要とされる。

はじめに、10m弦高低は、図6(a)に示すように標準偏差は全て0.3mm以下となり、実用上十分な精度が得られている。また、その精度には速度依存性は見られない。

次に、10m弦通りは、図6(b)に示すように標準偏差は最大で0.41mmとなり、在来線の軌道検測装置としては実用上十分な精度を得ている。なお、10m弦高低と同様、その精度には速度依存性は見られない。

本装置の曲線区間の通り変位の精度には、光ファイバージャイロの精度が大きく影響する。今回の区間は、曲線やこう配が短い区間で変化し、ジャイロの精度を維持するには厳しい線形である。一方、新幹線軌道は線形が理想的であり、かつ緩急曲線の角度変化は在来線よりも滑らかである。そのため、ジャイロを高精度の条件で利用できることから、本装置の測定機構によってもより高い精度が得られるものと考えられる。

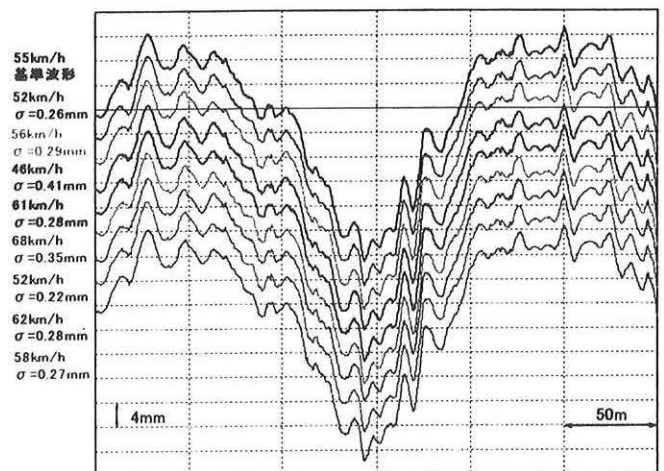
5.3 現行軌道検測車との整合性の検証

次に、JR東日本の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とを比較し、その整合性を検証した。図7は、それぞれの測定結果について、上段に10m弦高低の、下段に10m弦通りの波形を示したものである。ここに、本装置の結果は、軌道検測車の測定から3日後に測定された値であり、両者の測定速度は約60km/hでほぼ同一である。また、この間に保守作業等の投入はない。

図7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。一方10m弦通りでは、レール側面位置の検出方法の違いにより、細部の違いは見られるものの、両者の波形は形状、振幅ともに概ね一致している。このことより、本装置は、高低変位はもとより通り変位についても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ことがわかる。また、慣性正矢法



(a)10m 弦高低



(b)10m 弦通り

図6 車体装架型装置の繰返し測定時の再現性

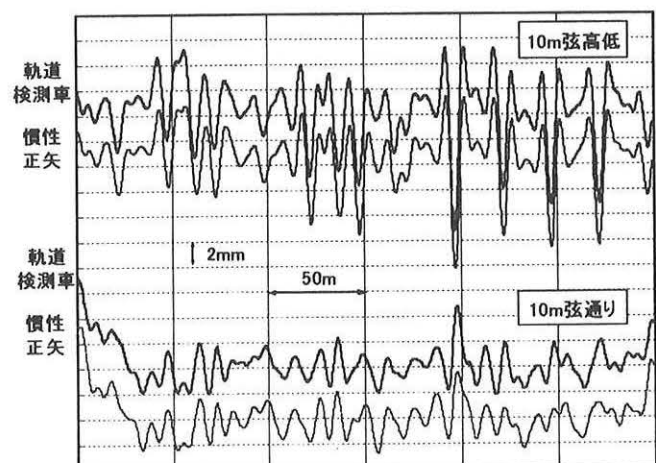


図7 軌道検測車と慣性正矢の比較

は、曲線区間の軌道管理に必要な曲線正矢を出力できることが特徴の一つである。この点についても、図7に示すとおり実用上問題のない精度が得られていることがわかる。

5.4 低速域の検出精度

本装置は、台車装架型と同様のセンサユニットと演算ユニットから構成されている。そのため、設計上は速度20km/hからの検出が可能である⁷⁾。しかし、今回の試験検測では、低速域の測定結果にバラツキが散見されている。図8は、その一例として、速度65km/hの10m弦通り(①)の測定結果と、速度25km/h前後の10m弦通り(②、③)の測定結果を示したものである。図のとおり、①と②の結果はほぼ一致しているものの、①と③の結果は最大で約4mmの差が生じている。

この原因としては、試験電車で使用されている形式の速度発電機信号が、同じ速度で必ずしも同じ電圧を出力していないことにありと推測される。そのため、これに対応する速度検出回路の改良を現在検討している。

5.5 欠線部の検出精度

4.3のとおり、車体装架型装置の測定範囲は、台車装架型装置に比べ面積にして約4倍に拡大される。そのため、結果としてレール継目部等の欠線部におけるダウンタイムが長くなる、あるいは脱線防止ガードレール等のレール以外の設備を誤認識する可能性がある。

このうち、今回の試験検測では、レール以外の設備を誤認識する現象は発生しなかったものの、試験検測の初期には、ダウンタイムの長さが影響し、レール継目部の遊間での光飛びが測定値に現れた。図9(a)は、その一例として、ある線区の定尺レール区間の軌間の測定結果を示したものである。

この結果を改善するため、2軸レール変位検出装置の制御アルゴリズムを改良し、レール継目部等の欠線部でのダウンタイム短縮を図った。具体的には、次の3点について改良を行った。

- ・欠線部等で変位計が著大な値を検出した際に、直前の測定値をホールドする
- ・更に、レール継目部等の欠線部によりレールを見失った瞬間の検出およびレールを再度発見するまでの時間を最大1ミリ秒短縮する
- ・レール形状を判定するアルゴリズムを改良する

これらの改良後に、先程の図9(a)と同じ区間を測定した結果を図9(b)に示す。図9(b)では、改良前に見られた光飛びは見られず、レール継目部においても安定した測定結果が得られていることがわかる。

欠線部の処理については、引き続き分岐器クロッシング部のような大きな欠線部に対する制御アルゴリズムを検討し、試験検測での確認により精度の向上を図る予定である。

6. おわりに

車体装架型慣性正矢軌道検測装置は、速度検出や欠線部の処理に若干の課題を残すものの、繰返し測定時の再現性の精度や現行軌道検測車との整合性の検証から、ほぼ実用精度に達していることが確認できた。今後は、引き続き長期耐久性の確認を行うとともに、制御プログラムの更なる改良によるレール欠線部等の検出精度の向上、および低速時の検出精度の補償について検討を行う予定である。

最後に、今回の営業線における試験検測に対してご協力を頂いているJR東日本の関係者の皆様に感謝を申し上げる次第である。

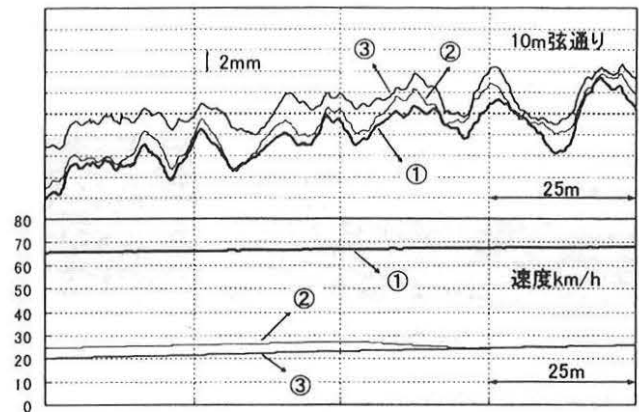
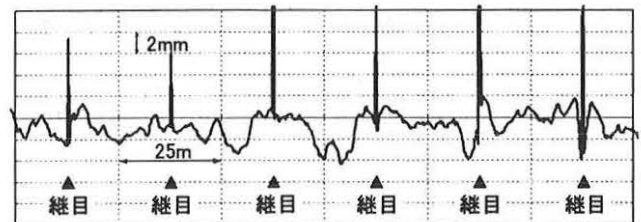
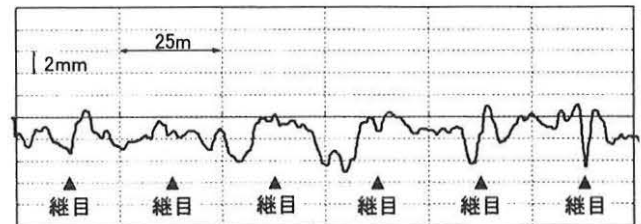


図8 低速時の検出不安定の一例



(a) 制御アルゴリズム改良前



(b) 制御アルゴリズム改良後

図9 定尺レール区間の測定結果(軌間)

参考文献

- 1) 坪川、矢澤、森高：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(J-Rail2008)、p453-p456、2008.12
- 2) 森高、松本、矢澤：九州新幹線車両による総合軌道検測実現に向けた技術開発、日本鉄道施設協会誌、2009.11(投稿中)
- 3) 矢澤、坪川：車体装架型2軸レール変位検出装置の精度向上策の検証実験、土木学会第63回年次学術講演会、4-039、2008.09
- 4) 片岡、小関、矢澤：在来線多目的試験車(MUE-Train)による軌道モニタリング装置の走行試験、土木学会第64回年次学術講演会、4-243、2009.09
- 5) 竹下、矢澤：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、2000.04
- 6) 矢澤、南木、片岡：車体装架型慣性正矢軌道検出装置による営業線試験検測、土木学会第64回年次学術講演会、4-248、2009.09
- 7) 坪川、矢澤、森高、松本：九州新幹線向け長期耐久試験用慣性正矢軌道検出装置の製作、土木学会第62回年次学術講演会、4-285、2007.09