

車体装架型慣性正矢軌道検測装置の開発

坪川 洋友* 矢澤 英治*
 小木曾 清高* 南木 聡明**

Development of the Body-mounted Track Measuring Device with the Inertial Mid-chord Offset Method

Yosuke TSUBOKAWA Eiji YAZAWA
 Kiyotaka OGISO Toshiaki NANMOKU

We have developed a prototype track measuring device adopting the inertial mid-chord offset method, which can be mounted on commercial railway vehicles. For testing the device, we set the device on a track inspection car and executed the running test for evaluating its practical measuring accuracy and durability for a long term. It should be mentioned that the measuring accuracy is not so high when the device is used under the condition of low speed. Therefore, we investigated a method for compensating the accuracy during the time when the inspection car runs with low speed. This paper describes the outline of the developed car body mounted device, the results of running test on commercial lines and the compensation method ensuring higher track measuring accuracy even under the condition of low speed.

キーワード：軌道検測，車体装架型軌道検測装置，慣性正矢法，1次差分法，2次差分法

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慣性正矢法を用いた軌道検測装置の開発を進めてきた^{1) 2)}。本装置を用いることで、これまで車両1台を使用してレール上の3断面で測定していた軌道検測車の機能を1断面の測定だけで実現することになり、小型化およびコストダウンができることになる。これまでの研究および営業線での試験検測により、車両の台車枠に設置する台車装架型については、実用可能な測定精度と再現性を得ることができ³⁾、九州新幹線の800系1000番台に搭載され実用化した⁴⁾。

一方、同装置を車体の床下に設置したいというニーズがあることを受け、2軸レール変位検出装置の測定範囲を拡大する研究を行ってきた^{5) 6)}。その結果、室内試験ではほぼ実用可能な精度を得て、車体装架型軌道検測装置実現の目処をつけた。そこで、在来線営業列車の車体に搭載して高頻度で軌道検測を行うことを目的として、車体装架型慣性正矢軌道検測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営業線で検測精度と長期耐久性の確認走行試験を行った。

* 軌道技術研究部 軌道管理研究室
 ** 軌道技術研究部 軌道管理研究室 (現 東日本旅客鉄道株式会社)

また、慣性測定法では避けられない現象として、低速域では検測精度が低下するという問題がある。そこで、この低速域での検測精度を補償し、列車の走行開始直後から検測波形を得る方法の検討を行った。

本論文では車体装架型装置の概要、営業線における試験検測の結果および低速域での検測精度補償について検討を行った結果を報告する。

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近傍でゲインが極く大きくなるため演算が不安定となる。そのため、倍率を制限するフィルタ処理を行って安定化を図ることが考えられるが、演算部をアナログ回路で構成すると、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、

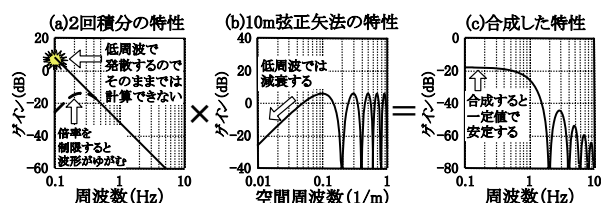


図1 慣性正矢法の測定原理

特集：軌道技術

10m弦正矢法の検出特性は図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近傍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」と称している²⁾。

2.2 台車装架型と車体装架型の特徴

慣性正矢軌道検出装置について、装架箇所別の特徴を表1に示す。車体装架型は、既に実用化されている台車装架型と比較して、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。その一方で、装置とレールの相対変位を測定するレーザー変位計の測定範囲を広くするため、結果として欠線部でのダウンタイムが長く、レーザー光が欠線部の通過直後に一度レールを見失った後、踏切板や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。

表1 装架箇所別の特徴

	長所	短所
台車	<ul style="list-style-type: none"> 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が短い 	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 除振が不要 搭載可能な車両を比較的容易に選択可能 	<ul style="list-style-type: none"> レール以外の物体が測定範囲に入りやすい 欠線部でのダウンタイムが長い

3. 車体装架型慣性正矢軌道検出装置の概要

慣性正矢軌道検出装置を車体装架した場合の検出精度と耐久性を確認するために、在来線試験電車に搭載できる車体装架型装置を製作した。以下に、製作のコンセプト、装置の構成、および本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。

3.1 製作のコンセプト

本装置の製作のコンセプトは以下のとおりである。

- (1) 将来の営業列車への設置を念頭に、車体床下への設置が可能な寸法・重量とする。
- (2) 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。
- (3) 無人収録を前提に、検出ユニット、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。

以上をふまえて、本装置の車上装置については必要最低限の構成とし、将来営業車に搭載が可能であるように配慮した。

3.2 本装置の構成

本装置は、光ファイバジャイロ、加速度計、後述する2軸レール変位検出装置および演算回路を一体のもの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。

検出ユニットの構成と取付状況を図2に示す。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。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よう光ファイバケーブルにより床下の制御ユニットに伝送される構成となっている。

なお、検出ユニットは、工場で厳密に調整・検定され、精度を得た状態で出荷しているため、基地等での現地調整なく車両に搭載可能である。

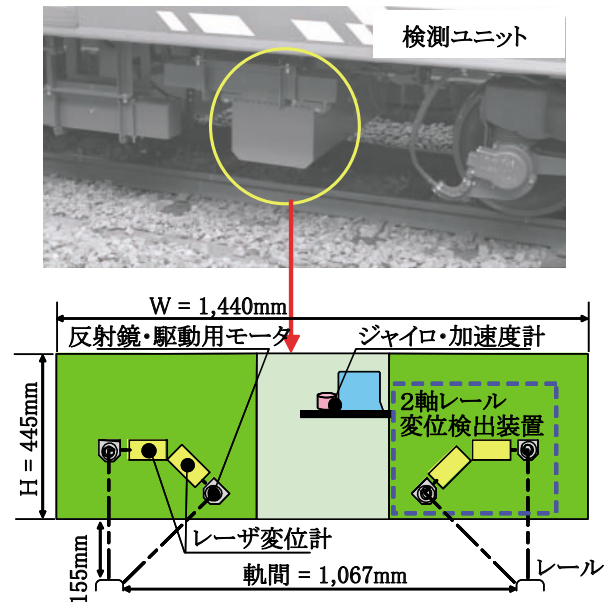


図2 検出ユニットの構成と取付状況

3.3 2軸レール変位検出装置

本装置の特徴的な構成部品に、図3に示す2軸レール変位検出装置がある。本装置は、反射鏡の角度を変えることにより、上下方向はレール頭頂面の中央を、左右方

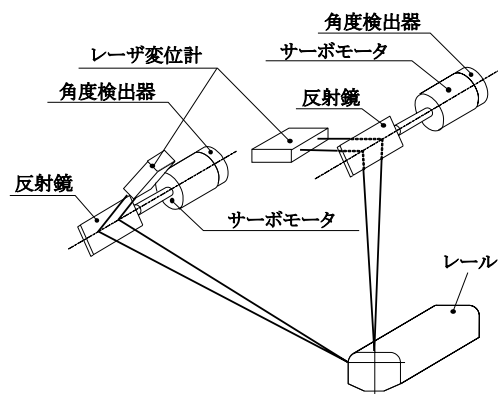


図3 2軸レール変位検出装置の構造

向は軌間線を外れることなくレーザーによって追尾する。そして、この2方向からの変位計の出力と2つの反射鏡の角度から、三角形の閉合計算によって、レールと装置との相対変位を算出している。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反射鏡の角度を自動的に調整し、レーザーがレールを追尾するように制御する。本装置では、この演算を1ミリ秒に1回繰り返している。

ここで、2軸レール変位検出装置の測定範囲は、台車装架型の場合、図4に示すように、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曲線部での車体偏倚が加わるため、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)へと拡大する必要がある。そこで、測定範囲を拡大した場合に検出精度を維持するために、温度変化によるひずみをごく小さく抑えた高精度反射鏡を用い、検出精度の向上を図っている⁶⁾。

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知する可能性がある。このため、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。

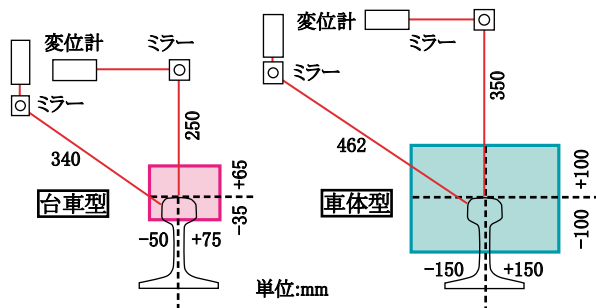


図4 2軸レール変位検出装置の光路長と測定範囲

4. 営業線における試験検出結果

JR東日本の在来線試験電車で製作した車体装架型装置を設置し、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⁷⁾。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ている。

4.1 繰返し測定による再現性精度の検証

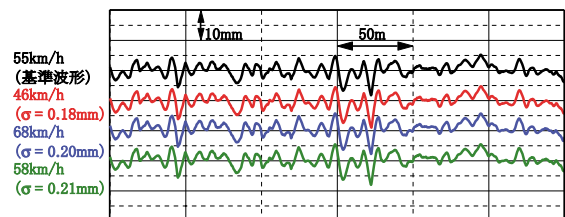
同一区間を繰返し測定したデータを用いて、測定の再現性の精度を検証する。図5は、約10‰の下り勾配中で、平面曲線が短距離で右-左-右と変化する区間を3日間

で9回測定したうちの4測定分の結果で、(a)は10m弦高低変位の、(b)は10m弦通り変位の波形である。波形の形状を比較するため基準をずらして示す。(図6, 9, 13も同様) 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を標準偏差で示した値である。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なる。

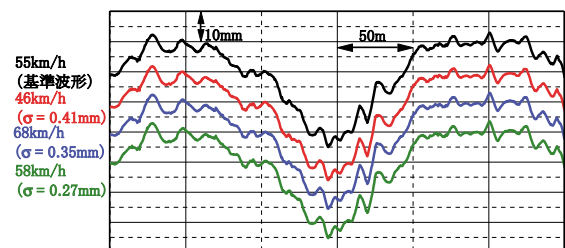
まず、10m弦高低変位の再現性誤差は、全て0.3mm以下となり、実用上十分な精度が得られている。また、その精度には速度依存性は見られない。

次に、10m弦通り変位の再現性誤差は、最大で0.41mmとなり、在来線用の軌道検測装置としては実用上十分な精度を得ている。また、10m弦高低変位と同様、その精度には速度依存性は見られない。

なお、本装置の曲線区間の通り変位の検測は、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、光ファイバジャイロの角度検出精度が大きく影響する。そのため、約10‰の下り勾配中で、曲線が短い区間で連続する区間は、ジャイロの精度を維持するには厳しい線形であるといえる。一方、新幹線軌道は線形がよく、かつ勾配や緩和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使用できることから、本装置によって高い検出精度が得られると考えられ、実際、九州新幹線では通り変位の検出精度も標準偏差0.3mm以下を達成している⁴⁾。また、光ファイバジャイロについては現行機材よりも低ドリフトの特性を有するモデルが提供される予定があり、このモデルでは特にヨー角の検出精度が一段と高くなっていることから、実用機製作段階では、このような反向曲線の連続する区間での検出精度は更に向上するものと考えられる。



(a) 10m弦高低変位



(b) 10m弦通り変位

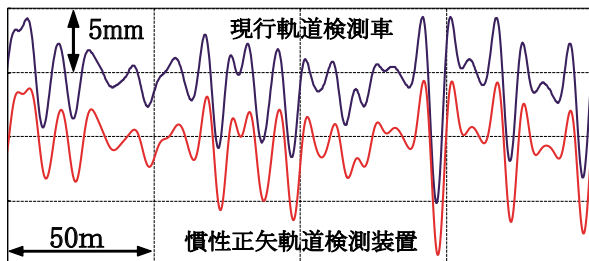
図5 繰返し測定による再現性

特集：軌道技術

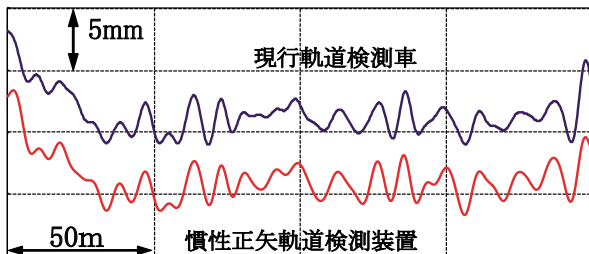
4.2 現行軌道検測車との整合性の検証

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。本装置の結果は、軌道検測車の測定から3日後の測定値であり、両者の速度は約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。それぞれの測定結果について、10m弦高低変位の波形を図6(a)に、10m弦通り変位の波形を図6(b)に示す。

10m弦高低変位は、本装置と軌道検測車の波形は非常に良く一致している。一方10m弦通り変位では、レール変位検出装置のレール側面の検出手法の違いにより、摩擦レールでの測定値が異なるという細部での違いが見られるものの、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。



(a) 10m弦高低変位



(b) 10m弦通り変位(曲線部)

図6 現行軌道検測車の検測結果との整合性

5. 低速時検測精度補償手法の検討

ここまで述べてきたとおり、車体装架型軌道検測装置は実用上の十分な精度を有している。その一方で、慣性測定法は加速度の積分を行うことから、加速度測定のス/N比が低下す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いる。しかし、今後の営業車によるモニタ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ことから、図7のように補助的にレール変位検出装置のみをもう1組搭載して、停止状態から測定を可能にする手法を検討した^{8) 9)}。このようにレール変位検出装置を追加で搭載することにより、慣性正矢軌道検測装置に内蔵されているジャイロを内蔵の信号と2組

の変位計の出力から、高低変位は単純な1次差分、通り変位は検出装置間隔での2回の測定結果の差分(2次差分)の原理によって、停止時からの検測が可能となる。

なお、2組の変位検出装置については、台車の軸距である最大2.5m程度と車輪径の和に若干の余裕を見込んだ距離だけ離す必要があるため、最短で3.5m程度の間隔で設置することになると考えられる。一方、装置の間隔が5mを超えると、1次差分値から10m弦正矢へ変換する際の伝達関数が不安定になるため、得られる10m弦正矢の波形も不安定となる。したがって、2組の装置の間隔は3.5~5mの範囲に限られる。

ところで、レール変位検出装置を2組搭載することは、検測車製作時のコストアップ要因となる。一方で、この方法では車体を測定基準に用いることになるのが、検出装置間隔が最大5mと短くかつ慣性測定のパックアップとしての低速走行時の検測に限定すると、走行中の車体の変形が検測精度に及ぼす影響は非常に小さいことが予想される。したがって3台車検測車製作時に行われた車体の補強や、2台車検測車用のレーザー基準装置搭載が不要になるので、検測車全体としては現行車両より低コストで製作できることになる。

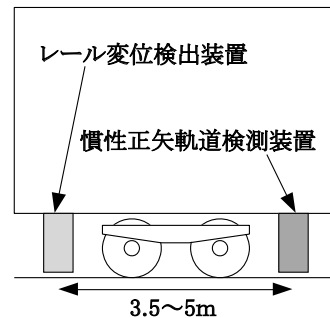


図7 レール変位検出装置の付加イメージ

5.1 高低変位の1次差分検測精度

高低変位の1次差分検測は、新幹線用軌道検測車の「長波長高低変位」という測定項目で実際に行われている。この項目は、検出器の間隔がおおむね10m以上に設定し、その名称が表すように長波長に高い感度があり、数km間であれば縦断線形図を作れる精度を有する。

このような特性を有する1次差分を、高低変位の低速時精度補償に利用することを考える。図8は、試算に用いた既存の新幹線検測車の高低変換器信号とジャイロ信号の関係を示したものであり、変換器の設置間隔は2.25mである。このような試算は過去1995年頃にも行われており、当時の3台車検測車に、開発途上の光ファイバジャイロを仮設して5m1次差分を検測し、これを10m弦正矢に変換した波形と、直接3台車で検測した波形との整合性誤差が、標準偏差にして0.6~1.0mm程度であったと報告されている。その後15年間にジャイロの精度は飛躍的に向上しており、特に新幹線用としてはファ

イバジャイロより高精度のリングレーザジャイロが使用されているため、この点からは当時の試算より大幅な精度向上が期待できる。一方、試算に用いた変換器の設置間隔は2.25mであり、既存の試算時よりも上述した想定される2組の装置の間隔よりもかなり短い。これは10m弦正矢への変換時に増幅倍率が高くなり、誤差を拡大することになるため、精度確保上不利な条件となるが、この状態で検測車として要求される精度を満たせば、将来の検測車ではさらに精度が上がることを期待できる。

試算には、低速走行時のデータを多数収録するために、新幹線各駅停車パターン検測のデータを使用した。図9に2.25m 1次差分から10m弦正矢への変換波形と、この車両の偏心矢測定系から10m弦正矢へ変換した波形の例を示す。両者は高い精度で一致し、このような短い検出器間隔の1次差分でも十分に高精度での検測が可能であることがわかる。

一方、この手法では、走行速度が上がってくると、車体の変形による誤差の発生が懸念される。そこで、検測速度と2つの波形の整合性誤差の標準偏差との関係を、1ロット100mに区切って確認した結果を図10に示す。走

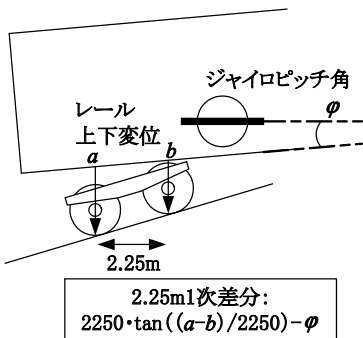


図8 高低変位の1次差分試算方法

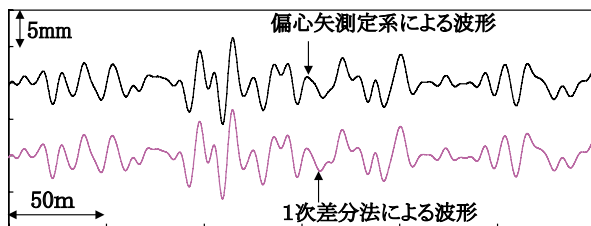


図9 10m弦高低変位の波形比較

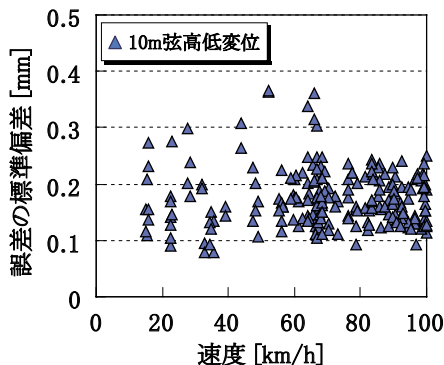


図10 速度と整合性誤差の関係 (10m弦高低変位)

行速度の増加に伴い、誤差の標準偏差も増加する傾向にあるが、速度約50km/hまでは、新幹線での精度目標である標準偏差0.3mm以下を満足している。以上より、本手法は慣性正矢法の低速時における検測精度補償手法として、十分実用可能であるといえる。

5.2 通り変位の2次差分検測精度

通り変位を1次差分検測としないのは、演算に方位角の正接の項が含まれるため、方位角±90度付近で発散して検測不能となるためである。したがって、環状線は言うまでもなく、新幹線路線であっても、例えば北陸新幹線は図11のように、軽井沢駅付近から長野駅付近にかけての走行中に180度以上向きを変えてしまうため、方位角のゼロ点をどのような向きに設定しても1次差分による検測は不可能である。このような事態が発生しない路線での運用に限定するならば、通り変位の1次差分検測も可能ではあるが、より汎用的な2次差分を用いて検測精度の確認を行った。

今回のデータを得た検測車でのレール左右変位検出装置の取付間隔は約3.2mである。そこで、図12のように、3.2m間隔での2回のレール左右変位の測定値とジャイロの方位角から、図中の角度θを求める。このときABCの各点は、辺ABおよび辺BCが3.2m、∠BACおよび∠BCAがθ/2の二等辺三角形である。また、実際のθは微小角なので、辺ACの長さはほぼ6.4mと考えて良い。

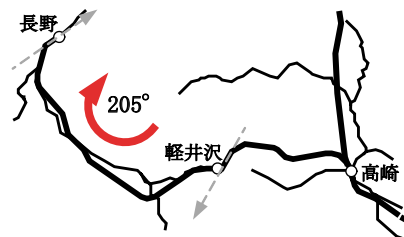


図11 北陸新幹線既開業区間の線形

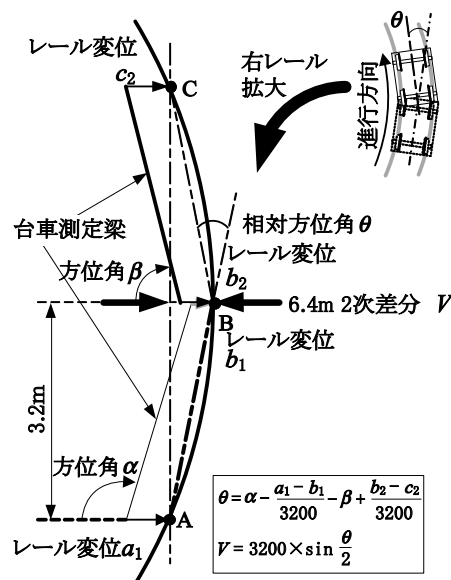


図12 通り変位の2次差分試算方法

特集：軌道技術

したがって、この二等辺三角形の高さを求めることにより、あたかも「6.4m弦正矢法」での検測結果のような値が得られることになる。しかし、本来の正矢法のようにレール上の3点を同時に測定しているわけではないので、ここでは正矢法による測定と区別し、この演算結果を「6.4m 2次差分」と呼ぶことにする。

この手法の検測精度の試算は、高低1次差分と同日の各駅停車パターン検測のデータで行った。図13に6.4m 2次差分から10m弦正矢への変換波形と、この車両の偏心矢測定系から10m弦正矢へ変換した波形の例を示す。一部の曲線の波形に若干の相違点が見られるが、これは両者の測定ともに利用した検測車第1・2軸のレール変位検出装置と、偏心矢測定時のみに用いる第4軸のレール変位検出装置との間で、急曲線区間の摩耗レール頭側面の検出高さの設定に若干の違いがあるために発生していると考えられる。したがって、レール頭側部の摩耗が非常に小さい直線部での整合性は十分にある。

また、検測速度と2つの波形の整合性誤差の標準偏差との関係として、1ロット100mに区切って確認した結果を図14に示す。速度30km/hまでは新幹線での精度目標である標準偏差0.3mm以下を満足し、さらに60km/h付近までの0.3mmを超えるロットは、上記の急曲線区間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。したがって、実際に検測車を構成する場合には、高低変位の1次差分と同様に50km/h前後で測定手法を切り替えることで、慣性正矢法の低速時における検測精度補償手法として、本手法が十分実用可能であることが確認できた。

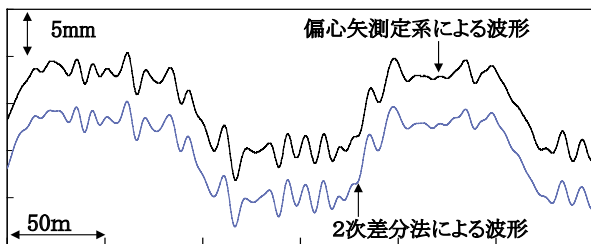


図13 10m弦通り変位の波形比較

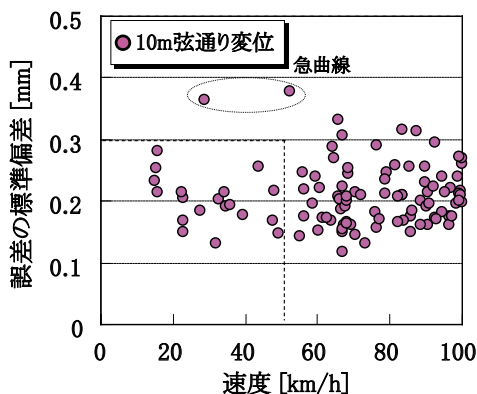


図14 速度と整合性誤差の関係（10m弦通り変位）

6. まとめ

車体装架型慣性正矢軌道検測装置の試作機を製作し、JR東日本の在来線試験電車に搭載して、約21,500km(稼働時約18,000km)の営業線走行試験を行った。その結果、本装置は在来線用の軌道検測装置として十分な精度と耐久性を有することがわかった。

また、慣性測定法では避けられない問題である、低速域での検測精度の低下については、レール変位検出装置をもう1組搭載して、高低変位については1次差分、通り変位については2次差分検測を併用することで列車走行開始直後からの検測精度を補償する方法の検討を行った。その結果、いずれの方法も慣性正矢法の低速域における検測精度補償手法として、実用可能であることがわかった。

謝辞

本件の営業線における試験検測を実施するにあたり、本装置の試験車への取付、取外しから現地試験にわたってご協力頂きました東日本旅客鉄道株式会社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方々に対し、ここに深謝の意を表します。

文献

- 1) 竹下邦夫：営業車による軌道狂い検測手法，鉄道総研報告，Vol.9, No.2, 1995.2
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 森高寛功，松本隆，矢澤英治：九州新幹線営業車による総合軌道検測，新線路，Vol.63, No.12, pp.26-28, 2009.12
- 5) 矢澤英治，坪川洋友：2軸レール変位検出装置の測定範囲拡大，土木学会全国大会第62回年次学術講演会，2007.9
- 6) 矢澤英治，坪川洋友：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，2008.9
- 7) 南木聡明，矢澤英治：車体装架型慣性正矢軌道検測装置の試験検測，第16回鉄道技術連合シンポジウム，2009.12
- 8) 南木聡明，矢澤英治，松田博之：1次差分法による慣性測定時の低速時高低検測精度補償，土木学会第65回年次学術講演概要集，2010.9
- 9) 矢澤英治，南木聡明，松田博之：2次差分法による慣性測定時の低速時通り検測精度補償，土木学会第65回年次学術講演概要集，2010.9