

# 保守用車に搭載可能な動的軌間・平面性測定装置の開発

坪川 洋友\* 石川 智行\* 塩野 幸策\*\*

Development of a Dynamic Track Measuring Device for Gauge and Twist that can be mounted on a Motor Car

Yosuke TSUBOKAWA Tomoyuki ISHIKAWA Kousaku SHIONO

There are two kinds of method for measuring track irregularity. One is a dynamic measurement with a track measuring car, and the other is static measurement by a hand-held measuring device of a trolley type. The track measuring car is very expensive, so static measurement is being carried out not only at regional railway operators but also at major railway operators when it comes to lines in the yard. However, the device for static measurement is lightweight, so it is not possible to obtain dynamic track irregularities due to the wheel load and lateral force during a vehicle running, which may cause a derailment accident. Therefore, with the aim of further reducing derailment accidents, we are developing a low cost measuring device for measuring gauge and twist affecting the driving safety of the vehicle which can be easily mounted on a motor car. In this paper, we report the outline of the measuring device and the results of running tests conducted to confirm its performance.

キーワード：軌間内脱線，乗り上がり脱線，動的軌道検測

## 1. はじめに

バラスト軌道は、レール、レール締結装置、まくらぎ、道床から構成される土木構造物であり、鉄道車両を支え、列車を円滑に誘導している。しかし、軌道は車両の繰り返し走行や経年により構成する部材が変形、摩耗など劣化していくため、その程度によっては車両走行時の軌道狂い（または軌道変位<sup>※</sup>）が大きくなり脱線事故の要因となることがある。軌道状態を原因とする脱線事故のうち、軌間内脱線は、木まくらぎの腐食等によってレールを締結している犬くぎの締結力が低下している状態で、車両から横圧が作用した際に軌間が拡大することで発生する。また、乗り上がり脱線は、曲線において平面性狂い（軌道面のねじれ）が大きな場合に、台車が3点支持状態となって輪重が減少し、そこに大きな横圧が作用したときに、車輪がレールに乗り上がることで発生する。このような軌道状態に関係する脱線事故を防止するためには、車両走行時に軌道に作用する輪重・横圧による動的な軌道狂いを測定（以下、「動的検測」という）して、その結果に基づき軌道の保守を行う必要がある。

一方、この動的検測に用いられる軌道検測車は、非常に高価であり、経営状態の厳しい地域鉄道事業者が導入することは困難である。また、大手鉄道事業者でも、軌道検測車の運用等の事情により構内線等では動的検測

を行えない場合がある。そこで、これらの箇所については、1年に1回程度の頻度で手押しの測定装置等を用いて軌道狂いを測定（以下、「静的検測」という）している。しかし、この静的検測の測定装置は軽量であり、車両走行時の動的な軌道狂いを得ることはできない。

以上のことから、脱線事故のさらなる低減を目的として、車両の走行安全性低下への影響が大きい動的な軌間及び平面性狂いを測定できる、保守用車または営業車両に搭載可能な小型で安価な測定装置の開発を進めている<sup>1) 2)</sup>。本論文では、開発中の装置による軌間、平面性狂いの測定方法の概要と性能確認のために実施した走行試験の結果について報告する。

## 2. 動的軌間・平面性測定装置の概要

本装置は脱線事故防止の観点から、軌間および平面性狂いを測定対象としている。

図1に軌間測定のイメージを示す。軌間は、左右のレールに帯状のレーザを照射し、カメラによりレール表面の輝線画像を撮影してレール断面形状を取得したのち、画像処理によりカメラとレールの側面の測定位置（軌間線の位置）との相対変位を算出し、左右の値を加算して求める。軌間の測定位置は、レール頭頂面からの高さ14mmまたは16mmの位置を選択できる仕様としている。

注) 本稿では、次の規則に従い表記する。  
「変位」：軌道検測に用いる各種機材・センサ類の測定値  
「狂い」：数点の変位から演算して求めた軌道の不整量の指標

\* 軌道技術研究部 軌道管理研究室

\*\* アクト電子株式会社

特集：軌道技術

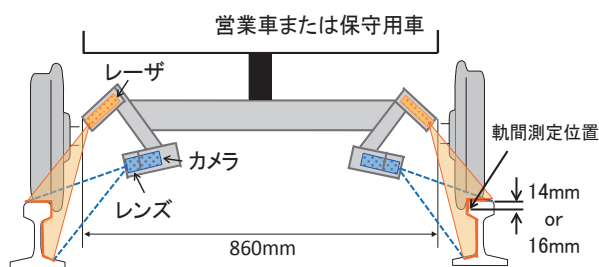


図1 軌間測定イメージ

平面性狂いは、軌道面のねじれを表すもので、一定距離だけ離れた2点の水準差から求まるため、本装置では水準の測定結果から演算により平面性狂いを算出する。

図2に水準測定イメージを示す。本装置では、上述した画像処理により、カメラの位置を原点としたレールの相対座標  $(x_r, y_r), (x_l, y_l)$  を取得している。水準は、本装置の中央部に設置された角度センサから求める軌道面に対する装置自体の姿勢から、装置の寸法を用いて左右のカメラの位置の座標  $(x_{cr}, y_{cr}), (x_{cl}, y_{cl})$  を算出することにより、左右のレール頭頂面の上下方向の座標  $y_r, y_l$  (レール頭頂面の測定位置) を求めて差をとることのできる。角度センサによる装置自体の姿勢の算出においては、車両の走行に伴う遠心加速度の影響を演算により補正する処理を行っている。また、平面性狂いの算出に用いる水準の離隔は、2.0m, 2.5m, 5.0m から選択できる仕様としている。

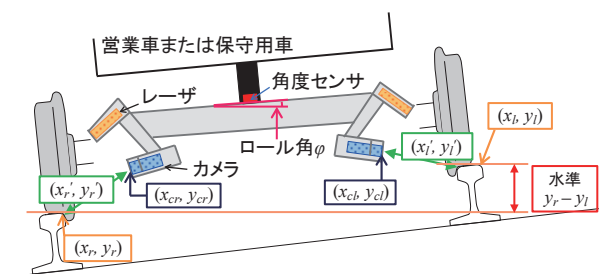


図2 水準(平面性狂い)測定イメージ

開発中の装置の全景を図3に示す。本装置はセンサユニット、コントローラ、測定用PC、パルス変換器から構成されている。センサユニットにはレーザーとカメラから構成されるセンサヘッド2台と角度センサが内蔵されており、重量は約7kgと一般的な軌道検測車のセンサユニットと比較して非常に軽量である。また、本装置では、走行距離および速度は一定間隔で出力されるエンコーダパルス等の信号をパルス変換器で処理することにより求めており、0.5m間隔で軌道狂いデータを出力可能である。本装置の駆動に必要な電力はAC100Vで5Aである。

次に、本装置の出力画面のイメージを図4に示す。出力画面では、キロ程(軌道延長上の測定位置)と軌間、水準および平面性狂いの測定値が表形式で示され、測定

値が予め設定した軌道整備基準値等のしきい値を超過した場合には赤く表示される。また、マウスのカーソルでキロ程を選択すると、その位置で検出したレール断面形状と画像処理によって得られる‘レール変位の測定位置’(ここでは、軌間および水準の算出に用いるレール側面およびレール頭頂面の測定位置のことを示す。)を確認できる。これにより、異常な測定値が見られた場合には、その原因を即座に把握することができる。

本装置の検測精度については、在来線の軌道検測車に求められる軌道狂いの再現性(2回の測定値の差の標準偏差)が、軌間0.5mm、水準1.0mmであるため、これを目標として開発を行っている。

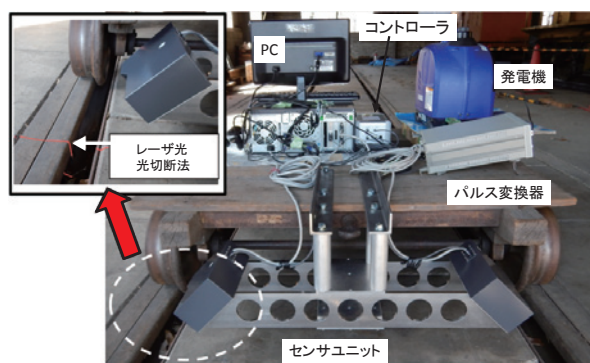


図3 装置の全景(レールにレーザーを照射した状態)

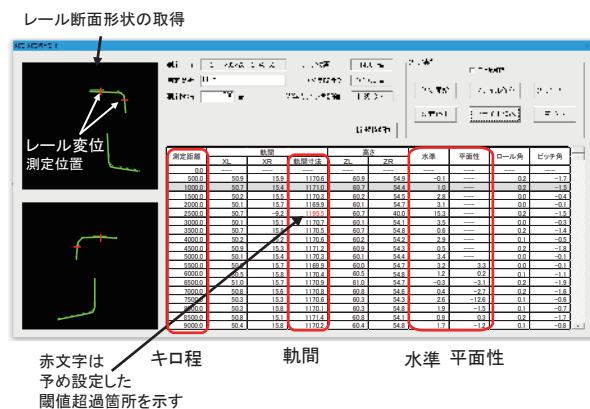


図4 本装置の出力画面イメージ図

3. 静的な検測精度の確認

3.1 室内試験

本装置に使用しているセンサ類の静的な性能を確認するために、室内試験を行った。

まず、画像処理を含むセンサヘッドのレール変位の測定性能を確認するために、装置を軌間1067mmの軌道の中央部に配置し、レールを固定した状態で装置を左右方向に±50mmの範囲で10mmずつ移動させ、軌間の測定値を確認した。その結果、軌間の測定値は1066.5

～1067.8mmであり、誤差は1.0mm以下であることを確認した。

次に、本装置に内蔵されている角度センサの性能を確認するために、角度センサをゴニオメータ（小さな角度範囲内で物体を精密に回転させるために使われる機器）上に設置し、ロール角とピッチ角を測定した。その結果、角度センサはロール角とピッチ角を±0.05°以下の精度で検出できることを確認した。

### 3.2 歩行速度での静的な走行試験

本装置を図5に示すようにトロ台車に取り付けて、鉄道総合技術研究所日野土木実験所の分岐器を含む50mの区間を繰り返し走行した。なお、この時点では、角度センサは未設置であったため軌間測定のみ精度の確認を行った。図5に、軌間測定試験の様子を示す。



図5 歩行速度での軌間測定試験の様子

まず、本装置を取り付けたトロ台車を5.0m間隔で停止させて測定した軌間と、軌間ゲージで測定した軌間を比較した。両者の比較結果を図6に示す。

図6より、本装置の測定値は軌間ゲージの測定値よりも全線に亘って約1mm大きいのが、測定した軌間の値が上昇および下降する傾向は一致しており、また2回の検測結果には再現性が見られることから、測定開始前のゼロ点調整を適切に行うことにより、十分な精度で測定が可能であると考えられる。

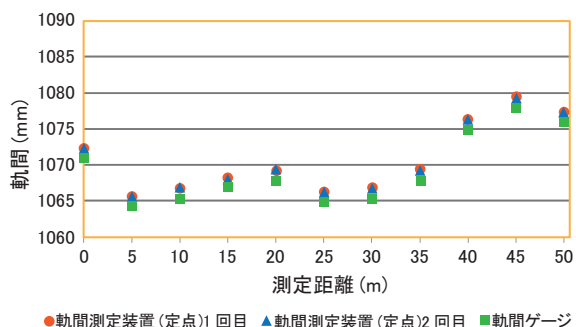


図6 軌間測定装置と軌間ゲージの比較結果

そこで次に、トロ台車を歩行速度で押して、50cm毎に測定した軌間と簡易型軌道検測装置<sup>3)</sup>で測定した軌間を比較した。両者の比較結果を図7に示す。

図7より、本装置の測定値では、クロッシング部やレールの継目部でレールの誤検知による異常値の発生が確認された。これらの箇所について、センサヘッドにより得たレール断面形状の画像を確認したところ、レールの形状は正確に取れているがレール変位の測定位置を誤って認識している場合が散見されていることから、レールの誤検知には太陽光などの外乱やレーザー光路上の支障物介在の影響が要因として考えられる。ただし、こうした箇所を除けば、本装置による測定結果は、簡易型軌道検測装置による測定結果と変動の傾向が一致しており、整合性が有ることが確認できる。また、レールの誤検知による異常値の箇所を除けば、本装置による2回の軌間測定値の差の標準偏差は0.33mmであり、静的な測定においては必要な再現性を有していることを確認した。

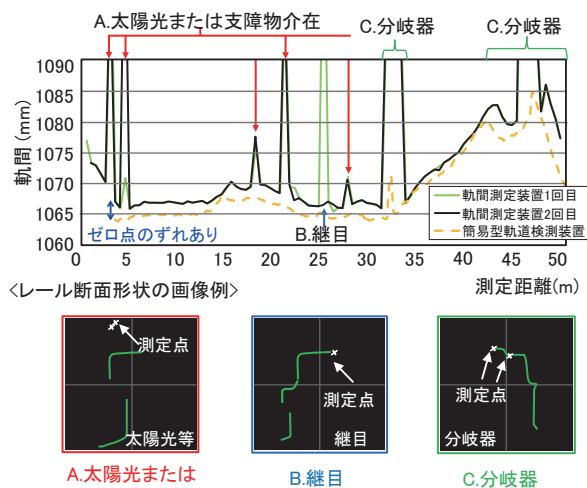


図7 軌間測定装置と簡易型軌道検測装置の比較結果

### 3.3 静的な走行試験での課題と対策

本装置の静的な走行試験の結果から、表1に示すように、測定不良の原因と考えられるそれぞれの課題に対して対策を実施した。

また、水準（平面性狂い）を測定するために、3.2.1項で性能確認した角度センサを本装置の中央部に設置した。

表1 静的な走行試験での課題と対策

課題	対策
1 太陽光による光量不足	使用レーザーの帯域の変更 赤色：波長 640nm → 青色：波長 405nm 直射日光防止用カバーの設置
2 レーザ光路上の支障物	レール検知エリアの最適化検討
3 分岐器クロッシング、継目などの欠線部	ソフトでの対策 (測定終了後のメディアフィルタ等)

特集：軌道技術

4. 動的な検測精度の確認

4.1 本装置のモーターカーへの搭載方法

本装置の動的な測定精度を確認するために、モーターカーへの搭載方法を検討した。

車両走行時の動的な軌道狂いを把握するためには、本装置のセンサユニットを可能な限り車輪に近い位置に搭載する必要がある。また、走行試験に使用するモーターカー以外にも汎用的に活用できる取付治具で、短時間で着脱可能な方法が望ましい。そこで、多くのモーターカーに共通の構造であると考えられるけん引装置を利用することとした。

けん引装置を利用した本装置のモーターカーへの搭載の様子を図8に示す。製作した取付治具をけん引装置に設置した後、本装置のセンサユニットを固定する方法としている。取付治具の重量は約22kgである。本装置を搭載したところ、検討したモーターカーの場合には、車輪から測定位置（レーザ照射位置）までの距離は1.15mであり、動的検測が可能であると考えられた。なお、装置の着脱は概ね30分程度で行える。

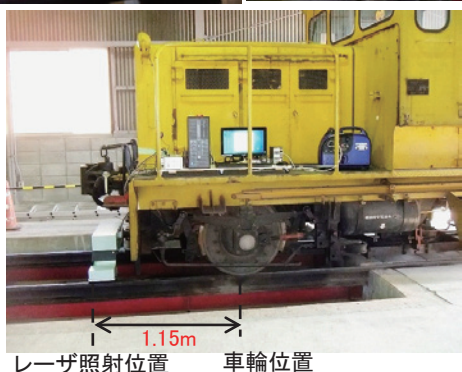


図8 本装置のモーターカーへの搭載方法

4.2 動的な走行試験

3章で述べた対策を行った装置を、図9に示すようにモーターカーに搭載して、鉄道総合技術研究所日野土木実験所の分岐器および曲線（半径約400m、設定カント約30mm）を含む区間を繰り返し走行した。本走行試験時には、既に述べたとおり、本装置の中央部に角度センサを内蔵し、また、直射日光対策としてセンサユニットにカバーを取付けた。



図9 動的軌間測定試験の様子

4.2.1 動的な軌間測定

本装置で動的軌間の測定が可能かを確認するために、半径約400mの曲線中において、地上にカンチレバー式の変位計を設置してモーターカー走行時のレールの左右方向の変位を12000Hzで測定し、本装置で測定した軌間との比較を行った。

図10にレールの左右方向の変位の測定箇所の概要図を、表2に各試番の測定条件を示す。当該箇所はPCまくらぎであり、試番1～4においてまくらぎ3, 4, 5, 6の順に締結装置のボルトを取り外して、最大4本連続で締結されていない状態で走行試験を行った。また、試験当日の天候は晴れのち曇りであり、測定を行った14時頃は西日が差しこんでいたため、試番5ではセンサユ

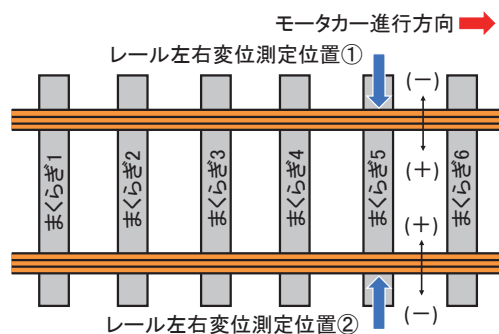


図10 レール左右方向の変位の測定箇所

表2 試番および測定条件

試番	締結装置	モーターカー速度 (km/h)	センサユニットカバー
1	全締結	10	有
2	まくらぎ3締結なし	10	有
3	まくらぎ3, 4, 5締結なし	10	有
4	まくらぎ3, 4, 5, 6締結なし	10	有
5	まくらぎ3, 4, 5, 6締結なし	10	無

ニットカバーを取り外し、太陽光に対するセンサユニットカバーの効果を確認した。

図 11 に動的軌間の測定結果を示す。

まず、動的な軌間の検出精度については、5 試番の測定結果は継目部、分岐器部でレール変位の測定位置を誤検知した区間および締結装置を外した区間を除くと概ね重なっていた。本装置の再現性を算出した結果、例えば、試番 1 と試番 4 の場合は測定値の差の標準偏差で 0.20mm、差の最大値で 0.54mm であり、モーターカーでの走行試験においても、振動等の影響を受けることなく十分な再現性があることを確認した。

一方で、取得したレール断面形状を確認した結果、全線の約 9% でレールを誤検知しており、そのうち約 58% が継目部、約 42% が分岐器部であった。この結果から、使用レーザの帯域変更およびレール検知エリアの最適化を行ったことにより、静的な走行試験時に比べて継目部および分岐器部以外でのレール誤検知は減少したと考えられるが、継目部および分岐器部については測定方法および処理方法を再検討する必要があることが分かった。

また、試番 4 とセンサユニットカバーを外した試番 5 を比較すると、センサユニットカバーの有無によって、軌間の測定値に大きな変化は見られなかった。試番 5 のレール断面形状を確認した結果、継目部および分岐器部の地点ではレールを検知できていなかったが、太陽光の影響によるレールの誤検知の発生はなかった。以上より、本走行試験ではセンサユニットカバーの効果を確認できなかったが、太陽光の照射する角度によっては測定値に影響が現れることが考えられるため、天候の異なる条件での試験を行って、センサユニットカバーの必要性を確認する必要がある。

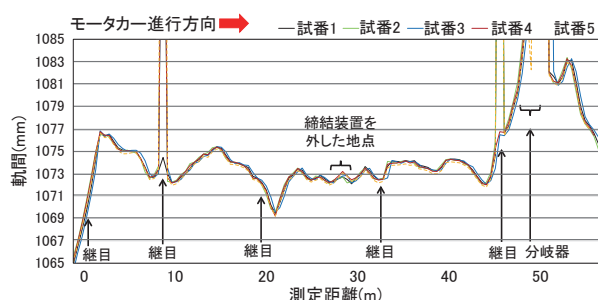


図 11 動的軌間の測定結果

次に、本装置の搭載位置で動的軌間の測定が可能であることを確認するために、締結装置を外した区間の結果を比較した。ここでは、試番 1 (全締結) と試番 4 (締結なし) のデータを用いて、地上で測定したレールの左右方向変位の測定結果を図 12 に、本装置で測定した軌間の測定結果を図 13 に示す。

図 12 と図 13 を関連づけるためには、本装置通過時のレールの左右方向変位を求める必要がある。本装置はモ-

ーターカーの車軸から 1.15m 離れた位置に搭載されているため、モーターカーの走行速度が 10km/h の場合には、装置はモーターカーの車輪が通過した位置を 0.43 秒後に通過することになる。そこで、レールの左右方向の変位の最大値が得られた時間を車輪通過時であると考え、同時刻から 0.43 秒後のレールの左右方向の変位を求めたところ、試番 1 が 0.15mm、試番 4 が 0.77mm であり、試番 4 では試番 1 よりも軌間が 0.62mm 拡大していたことがわかる。

一方、図 13 に示す本装置での軌間測定については、まくらぎ 4 本分の締結装置を外した試番 4 は試番 1 と比較して 0.49mm 大きくなっていった。

以上より、地上で測定した 2 試番のレール左右方向の変位の差 0.62mm と本装置で測定した動的な軌間の差 0.49mm は近く、本装置は動的軌間の測定が可能であると考えられる。一方で、車輪通過時の動的な軌道狂いを把握するには、車軸により近い位置に搭載する方法を検討するか、事前に走行速度毎に車輪通過時と装置通過時におけるレール左右変位の関係から補正係数を求めておき、本装置によるレール左右変位の測定値に係数を乗じ

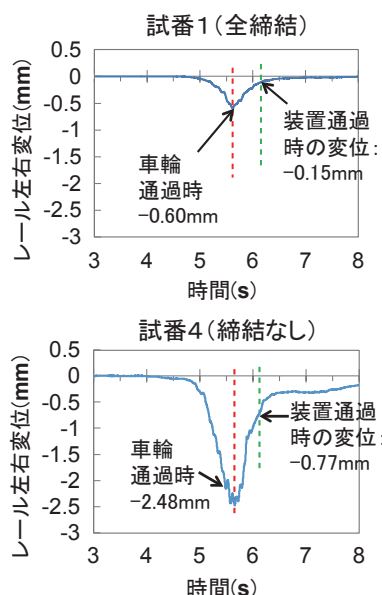


図 12 レール左右方向の変位の測定結果

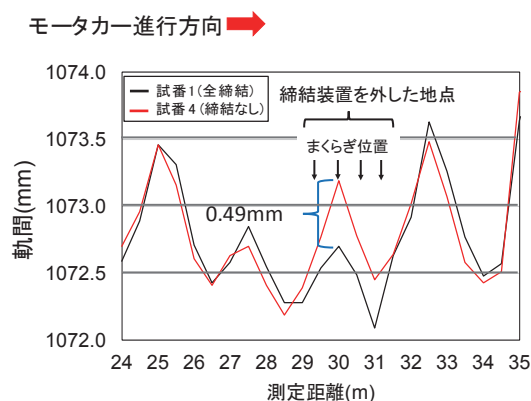


図 13 動的軌間の測定結果 (締結装置を外した地点)

特集：軌道技術

るなどして推定する必要があることが分かった。

4.2.2 動的な水準測定

本装置に内蔵した角度センサを用いて、水準および平面性狂いの測定が可能であることを確認するために、本装置で速度 10km/h、15km/h、20km/h で 2 回ずつ水準を測定し、標準ゲージで測定した水準、手押しの測定装置（簡易型軌道検測装置とは異なる装置）による水準との比較を行った。図 14 に動的な水準の測定結果を示す。

図 14 より、本装置の動的な水準の検測精度については、分岐器部でレール変位の測定位置を誤検知した区間を除くと、本装置の測定値と標準ゲージ、手押しの測定装置の測定値は概ね重なっていた。一方で、曲線区間の一部においては、速度が向上するほど本装置による水準測定値が大きくなっていることが確認された。

次に、本装置の再現性として、同速度の測定値の差をとり標準偏差を求めた結果、速度 10km/h で 0.63mm、速度 15km/h で 0.67mm、速度 20km/h で 0.56mm であり、モーターでの走行試験において、振動等の影響を受けることなく十分な再現性があることを確認した。

以上のことから、本装置による水準（平面性狂い）は、在来線用の軌道検測車と同等の再現性を有していると考えられる。一方で、速度の向上に伴って曲線区間の一部の測定値に差異が生じたことについては、今後の走行試験において、地上で車両走行時のレール上下方向の変位を測定して本装置の水準と比較することで、動的なレールの上下変位によるものなのか、その他の要因があるのかを確認する予定である。

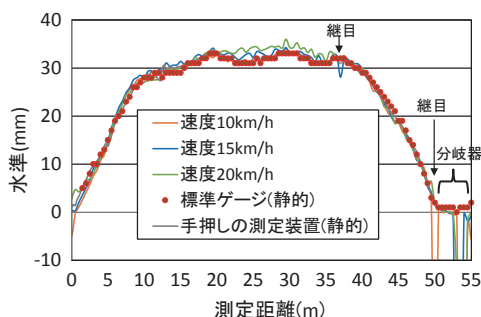


図 14 動的な水準の測定結果

4.3 動的な走行試験の結果

本装置の動的な軌間および水準の検測性能を確認した結果は次のとおりである。

- (1) 軌間については、同速度の 2 回の測定値の差の標準偏差で 0.20mm、差の最大値で 0.54mm であり、在来線用の軌道検測車と同等の再現性を有していること確認した。
- (2) 本装置で測定した軌間と、地上で測定したレールの左右方向変位の測定値を比較した結果、本装置は動的な軌間を測定可能であることが分かった。ただし、

車輪通過時の動的な軌間を把握するには、車軸により近い位置に搭載する方法を検討するか、走行速度毎に車輪通過時と装置通過時のレール左右変位の関係から補正係数を求めておき、本装置によるレール変位の測定値に係数を乗じるなどして推定する必要があることが分かった。

- (3) 水準（平面性狂い）については、同速度の 2 回の測定値の差の標準偏差は 1.0mm 以下であり、在来線用の軌道検測車と同等の再現性を有していることを確認した。今後の走行試験において、地上でレール上下方向の変位を測定して本装置の測定値との比較を行い、動的な水準の検測精度を確認する。
- (4) 本装置で取得したレール断面形状およびレール変位の測定位置を確認した結果、継目部および分岐器部においてレールの誤検知が頻発しており、これらの箇所については、測定方法および処理方法を再検討する必要があることが分かった。

5. まとめと今後の展望

脱線事故のさらなる低減を目的として、保守用車に搭載可能な動的軌間・平面性測定装置の開発を進めている。本装置について、歩行速度での静的な走行試験およびモーターに搭載した動的な走行試験を行った結果、本装置は軌間と水準を在来線用の軌道検測車に求められる精度で検測可能であることを確認した。

今後、本装置を営業列車と同じ構造の車両に搭載して走行試験を行う計画であり、その際に地上でレール上下方向の変位を測定して変位量を比較することによって、車両走行時の動的な水準の測定が可能であることを確認する。また、継目部、分岐器部ではレールの誤検知が頻発していることから、これらの箇所での測定方法およびデータ処理方法の検討を行う。さらに、本装置の搭載位置が車輪から離れた場合を想定して、車輪通過時の動的な軌道狂いの推定法を検討したのち、実用化を目指す。

文献

- 1) 石川智行, 坪川洋友: 簡易な動的軌間・平面性測定装置の試作と基本性能検証, 第 23 回鉄道技術連合シンポジウム, S2-6-1, pp.103-106, 2016
- 2) 石川智行, 坪川洋友: 軌間・平面性測定装置の試作と軌間測定機能の動的性能検証, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 第 VI 部門, pp.783-784, 2017
- 3) 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
- 4) 石川智行, 坪川洋友: 軌間平面性測定装置の改良と走行試験による動的性能検証, J-Rail2017 (投稿中)