

論文 動的軌間・平面性測定装置の開発と性能検証試験

石川 智行¹・坪川 洋友¹

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所（〒184-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）
E-mail:ishikawa.tomoyuki.38@rtri.or.jp, tsubokawa.yosuke.32@rtri.or.jp

軌道状態を原因とする脱線事故のさらなる低減を目的として、営業車または保守用車に搭載可能で低コストな動的軌間・平面性測定装置を開発した。開発した装置を軌道用モーターカーおよび旅客車の台車に搭載して軌道変位の測定試験を行ったところ、本装置は在来線用の軌道検測車に必要な再現性を有していることを確認した。また、本装置による軌道変位の測定結果と、地上で測定したレールの変位を比較したところ、本装置により車両走行時の動的なレール変位を測定できることを確認した。更に、本装置では軌道変位の測定時にレール断面形状を取得しており、2回のレール断面形状の取得結果を比較したところ、レール断面形状の取得結果には再現性があり、レール摩耗量の測定に活用できる可能性があることがわかった。

Key Words: Track Irregularity Maintenance, Gauge Widening Derailment, Flange Climbing Derailment, Dynamic Track Irregularity Measurement, Rail Wearing Depth Measurement

1. はじめに

バラスト軌道では、列車の繰り返し通過により、道床や路盤が変形して軌道変位が大きくなり、その程度によっては脱線事故が発生することがある。軌道変位を原因とする脱線事故のうち、軌間内脱線は、図-1に示すように、木まくらぎの腐食等により犬くぎの締結力が低下している状態で、車両からの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、図-2に示すように、曲線において道床の劣化等で浮きまくらぎが存在する場合等に、車両走行時の平面性変位が動的に大きくなり、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を原因とする脱線を防止するには、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変位を検測（以下、「動的検測」と言う。）し、その結果に基づいて道床のつき固め等の軌道保守作業を行うことが望ましい。

一方で、動的検測に用いられる軌道検測車は非常に高価であり、多くの地域鉄道事業者の路線や大手鉄道事業者の側線等では1年に1回程度の頻度で手押しの計測器等を用いて軌道検測（以下、「静的検測」と言う。）が行われている。しかしながら、手押しの計測器は軽いため、車両走行時の動的な軌道変位を把握することは困難

である。

以上のような背景のもと、軌道状態が原因となる脱線事故のさらなる低減を目的として、著者らは営業車または保守用車に搭載可能な小型で安価な動的軌間・平面性測定装置の開発を行っている¹⁾²⁾。本論文では、開発した動的軌間・平面性測定装置の概要と本装置を軌道用モーターカーおよび旅客車の台車に搭載して軌道変位およびレール断面形状の測定試験を行い、検測性能の検証を行った結果を示す。

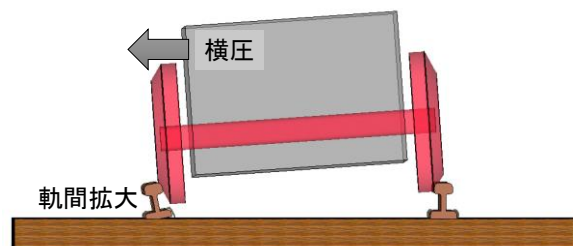


図-1 軌間内脱線

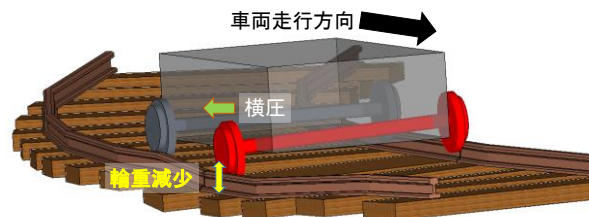


図-2 乗り上がり脱線



図-3 動的軌間・平面性測定装置（センサユニット）

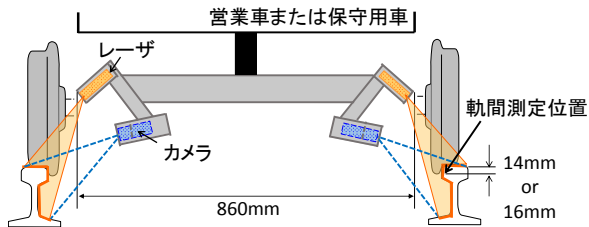


図-4 軌間測定イメージ

2. 動的軌間・平面性測定装置の概要

(1) 装置概要

動的軌間・平面性測定装置はセンサユニット、PC、コントローラ、パルス変換器から構成されている。本装置の駆動に必要な電力はAC100Vで5A程度である。

図-3に本装置のセンサユニットを示す。センサユニットにはレーザとカメラで構成される2次元レーザセンサ2台と角度センサが搭載されている。本装置では、2次元レーザセンサから、左右のレールに帯状のレーザを照射し、カメラでレーザ光を撮影してレールの断面形状の画像を取得して、画像処理によりカメラとレールの相対変位を求めている。太陽光対策として、2次元レーザセンサには青色レーザを採用しており、また、必要に応じてセンサユニットにカバーを取り付けられる構造になっている。本装置の角度センサには、軌道検測車に用いられる角度センサよりも安価なMEMSジャイロおよびMEMS加速度計で構成されるセンサを用いている。本装置のセンサユニットのサイズはカバーを取り付けていない場合は幅860mm×高さ160mm×奥行き230mm、カバーを取り付けている場合は幅1195mm×高さ360mm×奥行き230mmであり、重量は約7kgと一般的な軌道検測装置のセンサユニットと比較して非常に軽量である。

本装置ではパルス変換器にエンコーダまたはドップラーセンサからの信号を入力することにより、測定距離および走行速度を求め、一定間隔で軌道変位を測定することが可能である。

(2) 軌間測定機能

図-4に、本装置による軌間測定のイメージを示す。軌間については、レール側面上の測定点とカメラとの距離

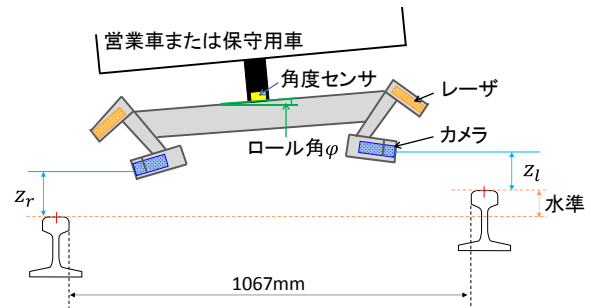


図-5 水準測定のイメージ



図-6 出力画面

を測定し、左右のレール側面上の測定点の変位量より算出する。なお、レール側面上の測定点については、各鉄道事業者の実情を考慮して、レール頭頂面から14mm下または16mm下を選択できる。

(3) 平面性測定機能

平面性変位は、一定距離だけ離れた2点間の水準の差から求めるため、本装置では水準を測定し、計算により平面性変位を算出する。

図-5に、本装置による水準測定のイメージを示す。本装置に搭載されている角度センサで取得した本装置の姿勢と、レール頭頂面上の測定点とカメラとの距離より、水準の測定を行う。本装置の変形は考慮しないこととし、角度センサにより取得した装置のロール角を ϕ 、左右のカメラと左右のレール頭頂面との距離を z_l 、 z_r とすると、水準 S は式(1)で算出できる。

$$S = 1067 \tan(\tan^{-1}(\frac{z_r - z_l}{1067}) - \phi) \quad (1)$$

なお、平面性変位の計算時に用いる水準の間隔は、各鉄道事業者の実情を考慮して、2.0m、2.5m、5.0mから選択できる仕様となっている。

(4) 出力画面

図-6に、本装置による測定結果の出力画面を示す。出力画面では測定距離（キロ程）ごとの軌間・水準・平面性の測定値が表示される。軌道変位の測定値が、設定した軌道整備基準値等の閾値を超過した場合は赤字で表示

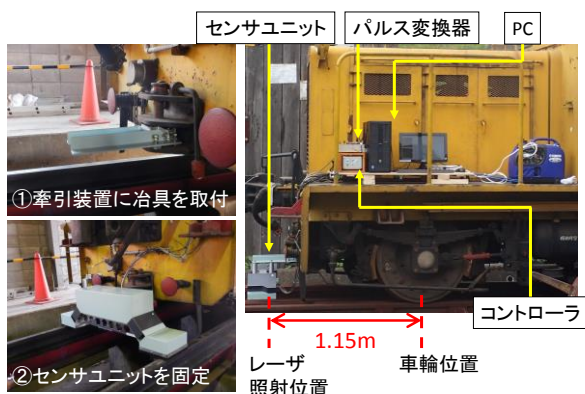


図-7 軌道用モーターへの搭載方法



図-8 軌道用モーターによる試験状況

される。また、測定位置を選択するとその位置のレール断面形状とレールの頭頂面および側面上のレール変位の測定点が表示される。これにより、異常な測定値が得られた場合には、レール断面形状を確認して著大な軌道変位が存在するのか、それとも測定時のエラーによるものなのかを把握することが可能である。

3. 軌道用モーターに搭載しての性能検証結果

(1) 試験条件

本装置を軌道用モーター（以下、「モーター」とする。）に搭載して軌間および水準の測定試験を行った。図-7のように、本装置のセンサユニットはモーターの牽引装置に治具を取り付ける方法で固定し、試験に使用したモーターの場合には、車輪から測定位置までの距離は 1.15m であった。この方法は一人で作業が可能であり、本装置のセンサユニットをモーターに取り付けるのに要する時間は約 30 分である。図-8 に、試験状況を示す。試験では約 60m の区間（半径 400m、カント 30mm の曲線区間を含む）で複数回を測定して、再現性（2回の測定結果の差の標準偏差）と整合性（標準ゲージによる測定結果との比較）を確認した。

また、軌間の測定試験では、本装置により動的な軌間

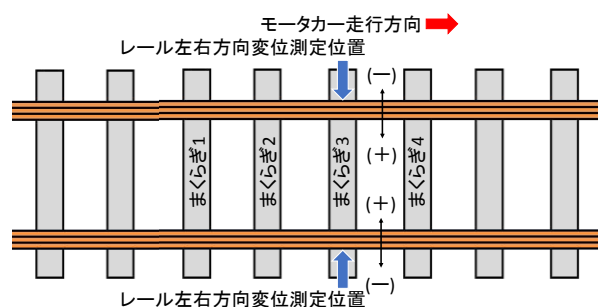


図-9 レール左右方向変位の測定箇所

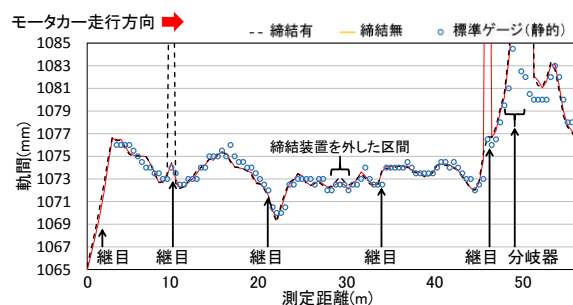


図-10 軌間の測定結果

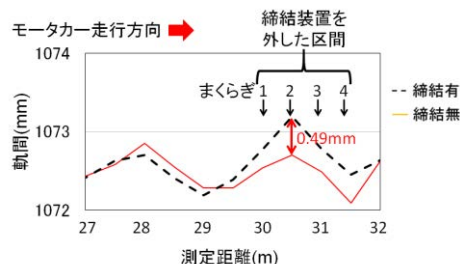


図-11 軌間の測定結果

を測定できることを確認するため、図-9のように、まくらぎ4本分の締結装置を外した条件（締結無）と締結装置を外していない条件（締結有）を設定し、地上では変位計によりモーター通過時のレールの左右方向の変位を測定し、本装置による軌間の測定結果との比較を行った。

(2) 試験結果

a) 軌間

図-10に、モーターの速度 10km/h で軌間を測定した結果を示す。整合性については、本装置でレールの測定点を正しく検知できなかった継目や分岐器の区間を除いて、本装置と標準ゲージによる測定結果に大きな差はないことがわかる。また、本装置による2回の測定結果より計算した再現性は、継目や分岐器の区間および締結装置を外した区間を除くと 0.20mm で、在来線の軌道検測車に求められる再現性である 0.5mm を下回り、十分な検測性能を有していることを確認した。

図-11に、締結装置を外した区間での本装置による測定結果を示す。締結無の試番では、測定距離 30m から 32m 付近において締結装置を外している。締結有無によ

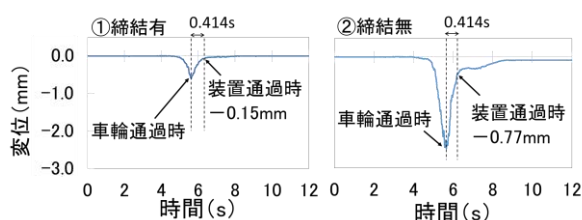


図-12 レールの左右方向変位

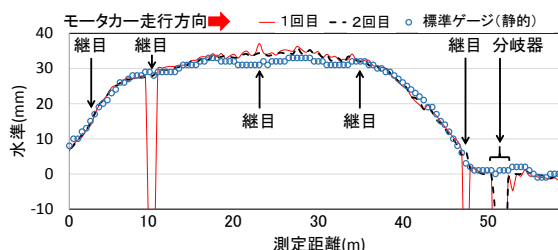


図-13 水準の測定結果

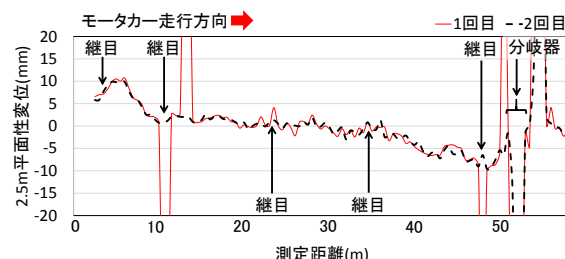


図-14 2.5m平面性変位（水準より算出）

る軌間の測定結果を比較すると、締結無の試番の軌間の測定結果は締結有の試番の軌間の測定結果よりも最大で 0.49mm 大きかった。

次に、図-12 に、モーター通過時のレールの左右方向変位の測定結果を示す。モーターの速度が 10km/h のとき、モーターの車輪が通過してから装置が通過するまでの時間は 0.414 秒となる。そこでモーターの車輪の通過時にレールの左右方向変位が最大になるとすると、本装置が通過する 0.414 秒後の変位は、①締結有では 0.15mm、②締結無では 0.77mm であり、レールの左右方向変位の締結の有無による差は 0.62mm ($0.77 - 0.15 = 0.62$) であった。この値は本装置による軌間の測定結果の締結の有無による差である 0.49mm に比較的近く、本装置により車両走行時の動的なレール変位を測定できることがわかった。動的な軌間を測定するためには本装置を車軸により近い位置に搭載することが望ましいが、車両の構造上困難な場合には、試験時の搭載位置でも動的な軌間の測定が可能であると考えられる。特に車両の走行速度が速くなると、車両からの横圧によるレールの左右方向の変位がなくなるまでの時間は短くなると考えられるが、車輪が通過してから装置が通過するまでの時間は短くなるため、動的な軌間を測定できる可能性がある。今後車両の速度を変化させて、動的な軌間が測定可能であるか検証する必要がある。

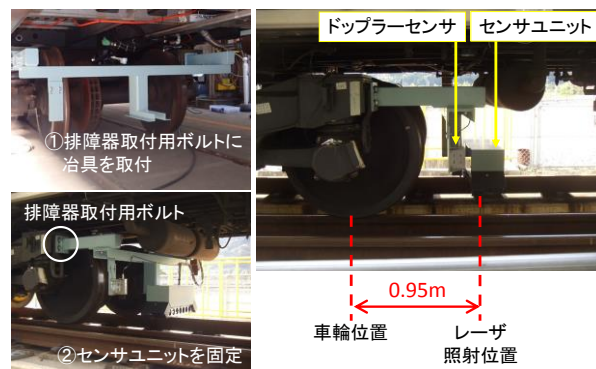


図-15 台車への装置の搭載方法

b) 水準

図-13 に、モーターの速度 20km/h で水準を測定した結果を示す。軌間の測定結果と同様に、継目や分岐器の区間ではレールの測定点を正しく検知できないことがあったが、2回の測定結果の再現性は、継目や分岐器の区間を除くと 0.56mm で、在来線用の軌道検測車に求められる再現性 1.0mm を下回っており、十分な検測性能を有していることを確認した。また、曲線部において本装置による測定結果は標準ゲージによる測定結果よりも大きくなっていた。この原因として、測定試験を行った線路では道床の状態等が悪かったため、車両走行時にレールが大きく沈下したが、このとき内軌の方が外軌よりも沈下量が大きく、その差が動的な水準変位として表れたことが考えられる。

c) 平面性変位

図-14 に、モーターの速度 20km/h で測定した水準から計算した 2.5m 平面性変位を示す。2回の測定結果の再現性は、継目や分岐器の区間を除くと 0.75mm で、在来線用の軌道検測車に求められる再現性 1.0mm を下回っており、十分な検測性能を有していることを確認した。

4. 旅客車の台車に搭載しての性能検証結果

(1) 試験条件

本装置をモーターに搭載して行った試験結果より、速度が 20km/h 以下では、本装置により軌間、水準、平面性変位の測定が可能であることを確認できたが、モーターに搭載して測定試験を行った区間は短く、線形や速度の条件が限定されていたため、異なる条件の線路で軌道変位の測定試験を行い、本装置の検測性能の評価を行う必要があった。そこで、高速な条件、また長距離の線路で本装置の検測性能の検証を行うため、三菱重工エンジニアリング株式会社が所有する MIHARA 試験センターにおいて、本装置を旅客車の台車に搭載して、軌間および水準の測定試験を行った。

図-15 のように、本装置のセンサユニットは台車の排

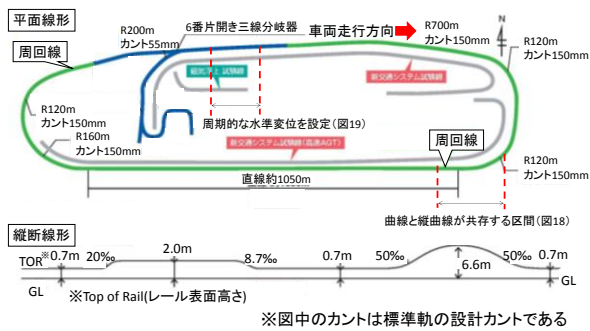


図-16 MIHARA 試験センター試験線の線形³⁾

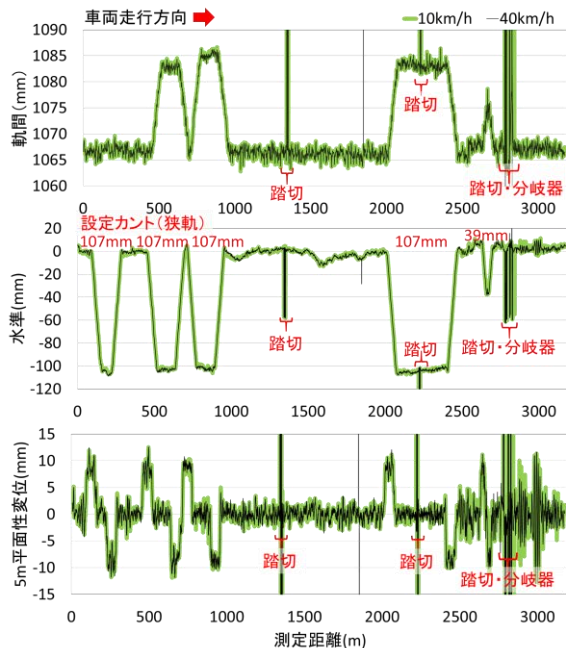


図-17 軌道変位の測定結果

障害取り付け用ボルトに治具を取り付ける方法で固定し、センサユニットの上下方向の位置は、治具とセンサユニットを固定する箇所を微調整できる構造とした。本装置のセンサユニットと車輪の距離は 0.95m であり、モーターに搭載した場合よりも車輪に近い位置で軌道変位の測定が可能である。台車に治具を取り付けるのに要する時間は約 1 時間、本装置のセンサユニットを台車に固定するのに要する時間は約 20 分である。また、センサユニットの固定に用いた治具にはドップラーセンサも取り付けることが可能である。なお、PC、コントローラ、パルス変換器等は車両上に設置している。

図-16 に、MIHARA 試験センターの試験線の線形を示す。走行試験は図中の周回線を行った。周回線の延長約 3.2km、軌間 1067mm と 1435mm の三線軌条が敷設されており、半径 120m、カント 107mm (狭軌) の曲線と勾配 50‰ の縦曲線が共存する区間が存在する。また、北側の直線の区間には、波長 12m、片振幅 3mm の水準変位 3 波と波長 12m、片振幅 6mm の水準変位 3 波を設定した。測定試験での車両の走行速度は 10～40km/h として、異

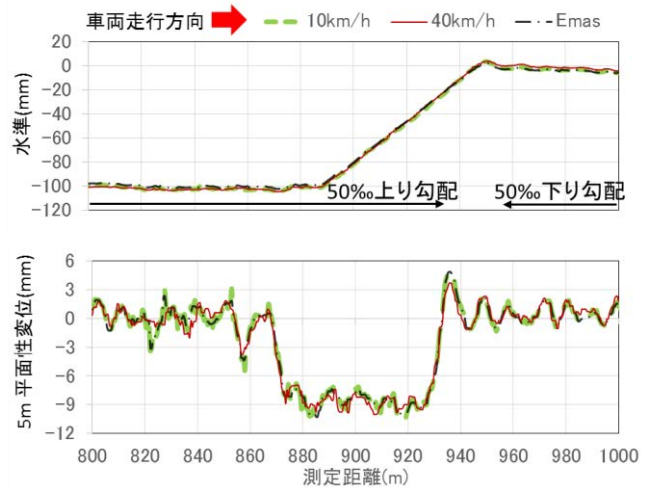


図-18 曲線と縦曲線が共存する区間の測定結果

なる速度で軌道変位を測定した結果から再現性を計算した。また、Emas (簡易型軌道検測装置)⁴⁾による測定結果と本装置による測定結果を比較し、整合性の確認を行った。なお、本装置および Emas による測定は軌間 1067mm のレール (狭軌) で行った。

(2) 試験結果

図-17 に、車両の走行速度を 10km/h および 40km/h で、軌間、水準、5m 平面性変位を測定した結果を示す。本図より、踏切や分岐器の区間でレールの測定点を正しく検知できず、著大な測定値が得られることがあったが、踏切と分岐器の区間を除くと、2 回の測定結果は概ね重なっていた。なお、車両の走行速度が 20km/h、30km/h で軌道変位を測定した結果についても、速度が 10km/h、40km/h で軌道変位を測定した結果と同様の傾向が得られた。

速度 10km/h で周回線 1 周分を測定した結果と速度 40km/h で周回線 1 周分を測定した結果の再現性は、レールの測定点を正しく検知できなかった踏切や分岐器等の区間を除くと、軌間が 0.16mm、水準が 0.99mm、5m 平面性変位が 0.67mm であり、在来線用の軌道検測車に求められる再現性 (軌間 0.5mm、水準および平面性変位 1.0mm) を下回っており、十分な検測性能を有していることを確認した。

ここで、本装置ではジャイロの計測結果から姿勢角を計算する際に、積分のノイズにより正しい角度から少しずつずれていくドリフトという現象が発生することがある。特に、曲線と縦曲線が共存する区間では、車両の進行方向に対する上下 (ピッチ) 方向の角速度および左右 (ヨー) 方向の角速度の計測結果が影響して、ロール角の値にドリフトが発生し、水準の測定結果にずれが生じる可能性がある。そのため、図-18 に、曲線と縦曲線が共存する区間における、本装置および Emas により軌道変位を測定した結果を示す。本図より、本装置による水

準および平面性変位の測定結果と Emas による水準および平面性変位の測定には大きな差はなく、曲線と縦曲線が共存する区間においても、本装置により水準および平面性変位を高精度で測定可能であることを確認した。

また、周期的な水準変位がある区間を車両が走行する場合、台車や車体は車両の進行方向前後の軸に対して回転（ローリング）する。ここで、一定の周波数の水準変位がある区間を異なる速度で走行すると車両の振動特性に応じて、台車や車両のローリングの程度は変動する。このとき、本装置の軌道面に対する角度や2次元レーザーセンサとレールとの位置関係が変化するため、軌道変位の測定において、レール変位の測定点を正しく検知できなくなることが考えられる。そのため、図-19 に、周期的な水準変位を設定した区間において、車両の走行速度を10km/hと40km/hとして、軌道変位を測定した結果を示す。本図より、速度10km/hと速度40km/hの測定結果に大きな差はなく、周期的な水準変位が設定されている区間においても、本装置により軌間および平面性変位を高精度で測定可能であることを確認した。

5. レール断面形状の取得結果

2章で述べたように、本装置では軌道変位の測定に加

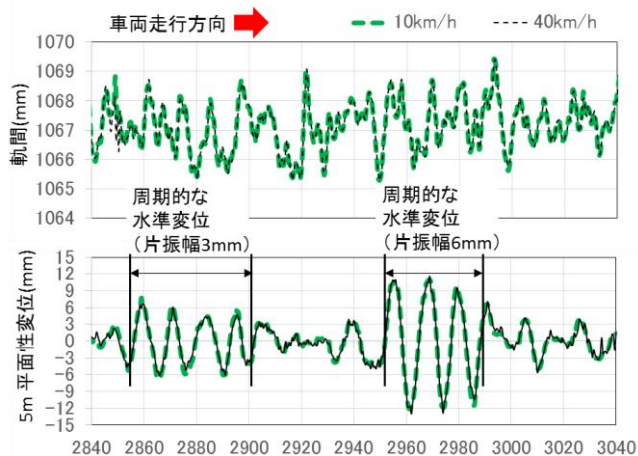


図-19 周期的な水準変位を設定した区間の測定結果

えて、レール断面形状の画像を取得している。図-20 に、本装置で取得した通常のレール、継目および分岐器のレールの断面形状を示す。

ここで、本装置のレール摩耗検査への適用可能性を検討するため、レール断面形状の測定精度の検証を行う。

図-21 に、0.5m 間隔で取得した分岐器のポイント部のレ

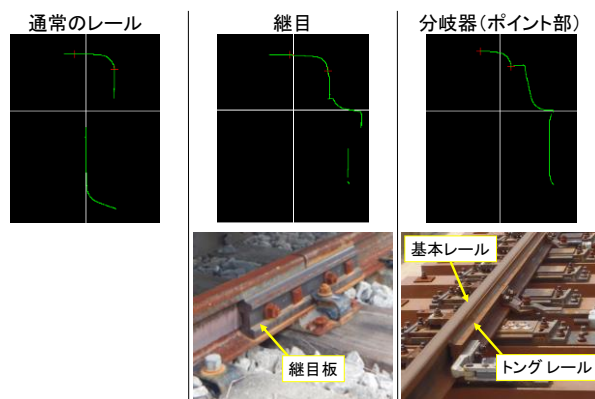


図-20 装置で取得したレール断面形状

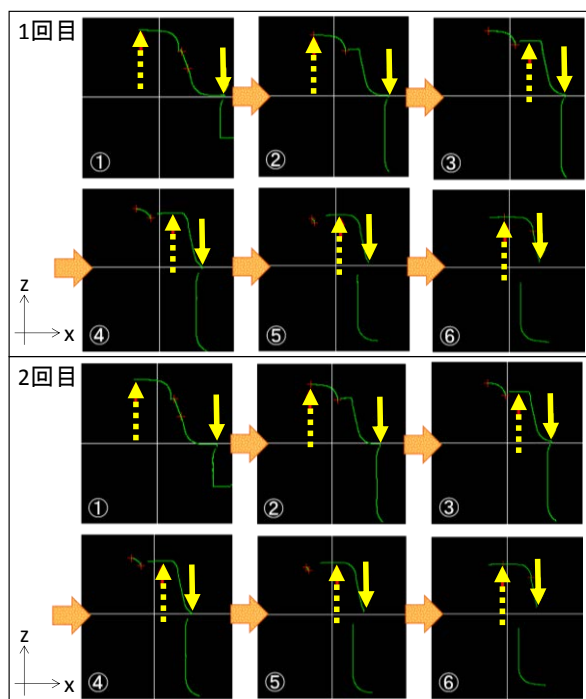


図-21 分岐器のポイント部のレール断面形状の変化

表-1 2回のレール断面形状の取得結果の比較

単位：mm

画像	1回目			2回目			1回目と2回目の差
	基本レール 頭頂面z座標	トンブレール 先端z座標	差	基本レール 頭頂面z座標	トンブレール 先端z座標	差	
①	38.434	1.082	37.352	36.461	-0.516	36.977	0.375
②	41.155	1.055	40.100	40.023	-0.321	40.344	-0.244
③	45.268	1.371	43.897	45.999	1.647	44.352	-0.455
④	47.162	-0.044	47.206	47.782	1.239	46.543	0.663
⑤	50.935	4.522	46.413	50.505	4.232	46.273	0.140
⑥	51.293	7.102	44.191	52.186	8.418	43.768	0.423

ール断面形状を示す。図中の①から⑥は、レール断面の画像を取得した順番であり、①でトンゲレールの先端部分が現れ、⑥でトンゲレールが基本レールに置き換わり、基本レールは画面から消えている。図中の破線の矢印は基本レールの頭頂面、実線の矢印はトンゲレールの先端を示しており、矢印で示した位置の点の z 座標の差を計算して、2回のレール断面形状の取得結果について、算出した z 座標の差を比較した。表-1に、2回のレール断面形状の取得結果を比較した結果を示す。表-1より、1回目と2回目の差は1mm以下であり、分岐器のポイントのようにレール長手方向のレール断面形状の変化が大きい箇所であっても、レール断面形状の取得結果に高い再現性が得られていることを確認した。

以上より、本装置によりレール断面形状を高精度で取得可能であるため、本装置で取得したレール断面形状とレール断面の設計図を照合することにより、レール摩耗検査に活用できる可能性がある。

6. おわりに

保守用車または営業車に搭載可能な低コストな動的軌間・平面性測定装置を開発した。開発した装置を軌道用モータカーおよび旅客車の台車に搭載して軌道変位の測定試験を行ったところ、40km/hまでの速度で軌間および平面性変位を高精度で測定可能であることを確認した。

また、本装置は既存の軌道検測車と同等の測定精度を有していること、車両走行時の動的なレール変位を測定できていることを確認した。更に、本装置は軌道変位の測定時に、レール断面形状を取得しており、2回のレール断面形状の取得結果を比較したところ、レール断面形状の取得結果には再現性があり、レール摩耗量の測定に活用できる可能性がある。一方で継目、分岐器、踏切の区間の測定方法および直射日光対策については今後検討が必要である。今後は測定試験により明らかとなった課題に対応し、装置の実用化にむけて改良を続けていく予定である。

参考文献

- 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回鉄道技術連合総合シンポジウム, 2016.
- 2) 石川智行, 坪川洋友: 動的軌間・平面性測定装置の改良と走行試験による動的性能検証, 第24回鉄道技術・政策連合総合シンポジウム, 2017.
- 3) 三菱重工業株式会社 交通・輸送ドメイン 交通機器事業部 O&M 推進室: 総合交通システム検証施設”MIHARA 試験センター”の設備の充実, 拡張と活用について, 三菱重工技報, Vol.53, No.3, pp.10-14, 2016.
- 4) 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, 2015.

(2018.4.6 受付)

Development of the Measuring Device for Track Irregularity of Gauge and Twist and Results of its Performance Verification Test

Tomoyuki ISHIKAWA and Yosuke TSUBOKAWA

In order to prevent derailment due to track irregularity further, we are developing the new device to measure dynamic track irregularity of gauge and twist that can be mounted on a track motor car or a commercial car bogie, which we suppose to use the new device. For performance verification of measuring, we measure dynamic gauge and cross level by mounting the device on a track motor car and bogie of a passenger car. As a result, the new device have a high performance about track measurement because the measurement result of the device have a repeatability equivalent to a track inspection car. Also, we confirm that the device can measure dynamic rail displacement by comparing rail displacement measured on ground. Moreover, the new device can obtain rail cross section images when measuring track irregularity, and we can obtain the images with high repeatability. Therefore the device might be able to use evaluation rail wear-depth.