

車両搭載型の動的軌間・平面性測定装置の開発

坪川 洋友

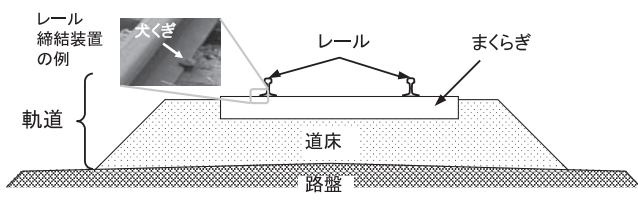
鉄道における軌道の管理については、今後想定される保線技術者の不足等に備えて、メンテナンスの効率化や管理コストの削減を行いながらも、従来どおりに車両が安全に走行できる軌道状態を維持することが求められる。軌道状態の確認には、軌道検測車により車両走行時の動的な軌道変位を把握することが最も有効であるが、検測車は非常に高価であり、経営状態の厳しい地域鉄道事業者が導入することは困難である。そこで、測定する軌道変位の項目を、車両の走行安全性の低下の要因になることの多い軌間及び平面性変位に限定して低コスト化を図った、車両搭載型の動的軌間・平面性測定装置（以下、「本装置」という。）を開発した。本稿では、本装置の機能や特徴について紹介する。

キーワード：動的軌間・平面性測定装置、軌道変位、2次元センサ、再現性、RTK-GNSS

1. はじめに

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、鉄道車両の走行を誘導する土木構造物である。図-1に軌道の構成と各軌道部材の機能を示す。

鉄道車両は軌道に沿って走行するため、軌道の形状が歪んでいると、車両の走行安全性や乗り心地が悪化する。そのため、鉄道事業者では、図-2に示す軌



<各軌道部材の機能>
 まくらぎ : 2本のレールを所定の軌間に固定するとともに、列車の荷重を分散する
 レール締結装置 : レールをまくらぎに固定して、軌間が拡大や縮小しないように保持する
 道床 : まくらぎを固定するとともに、列車の荷重を受け止め、路盤に分散する

図-1 軌道

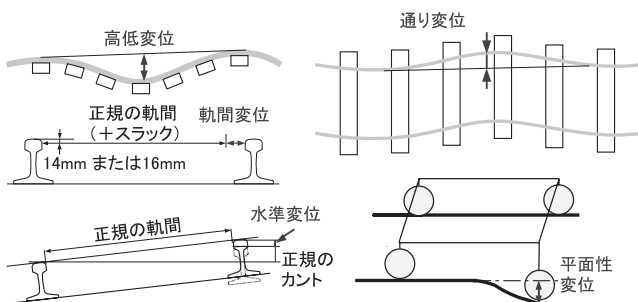


図-2 軌道変位の種類

道変位を定期的に測定して形状のゆがみを把握し、その結果に基づいて軌道の補修を行うことで適切な状態を維持している。一方、軌道には、車両が走行する際に車両の重量や運転速度などに応じた力（輪重・横圧）が作用する。そのため、車両走行時の軌道変位（以下、「動的な軌道変位」という。）は、車両が走行していない時の軌道変位とは異なる。バラスト軌道においては、特に、レール締結装置、まくらぎ、道床などの軌道を構成する材料が劣化すると、動的な軌道変位が大きくなり、脱線事故の要因となることがある。

近年発生した軌道状態の要因を含む事故の多くは、軌間内脱線と乗り上がり脱線である。各脱線の発生イメージの例を図-3に示す。軌間内脱線については、木まくらぎの腐食等によって犬くぎのレール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犬くぎの押し出し・抜け上がり等が生じて軌間が拡大

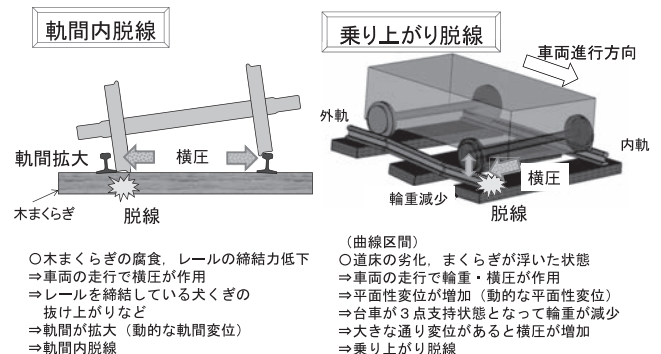


図-3 軌道状態を原因とする脱線事故の発生イメージ



図-4 軌道検測車 (マヤ 34 形)

し、車輪が軌間内に脱線する。また、乗り上がり脱線については、曲線中や緩急曲線（直線と円曲線をつなぐ緩衝区間）において、道床の劣化等によりまくらぎが浮いた状態で、車両から輪重が作用した際に軌道が沈下して平面性変位が動的に大きくなり、その結果と台車が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げて脱線する現象である。

これらの脱線の発生を防ぐには、図-4に示すような軌道検測車により車両走行時の動的な軌道変位を把握することが最も有効であるが、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、検測車を所有している鉄道事業者でも、運用上の理由により駅構内の全ての線路や側線を測定することはできない。そのため、これらの箇所においては、1年に1回程度の頻度で手押し

の測定装置等により軌道変位を測定しているが、この装置は軽量で動的な軌道変位を得ることはできない。

そこで、軌道状態の要因を含む脱線事故のさらなる低減を目的として、測定する軌道変位の項目を車両の走行安全性の低下の要因になることの多い軌間及び平面性変位に限定して低コスト化を図った、車両搭載型の動的軌間・平面性測定装置を開発した。

2. 動的軌間・平面性測定装置の概要

(1) 本装置の構成及び軌道変位の算出方法

動的軌間・平面性測定装置は保守用車等に搭載して、車両走行時の動的な軌間・水準・平面性変位を測定する装置である^{1,2)}。本装置は、図-5に示すセンサユニット、ドップラーセンサ、コントローラで構成される。本装置のセンサユニットには、レーザ光源と3次元計測用カメラで構成される2次元レーザセンサ（以下、「2次元センサ」という。）が2台と、3軸のジャイロと3軸の加速度計から構成される角度センサが搭載されている。

図-6に、本装置による軌間と水準（平面性）の測定のイメージを示す。本装置ではセンサユニットの両端に設置した2次元センサにより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断面形状の画像を取得する。そして、取得した画像に対して処理を行って、軌道変位の算出に使用するレール頭頂面とレール側面の変位測定点を検出す

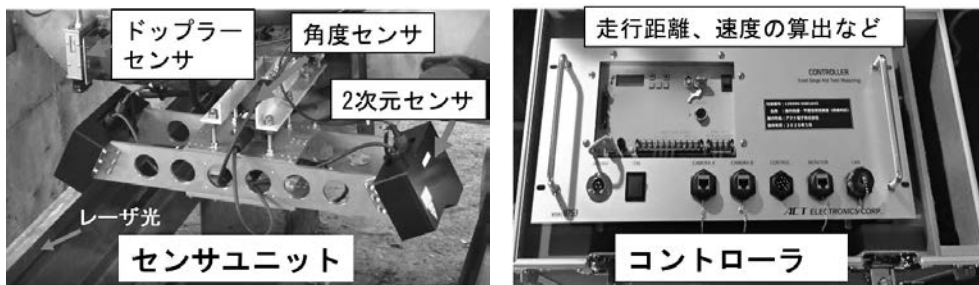


図-5 本装置の構成

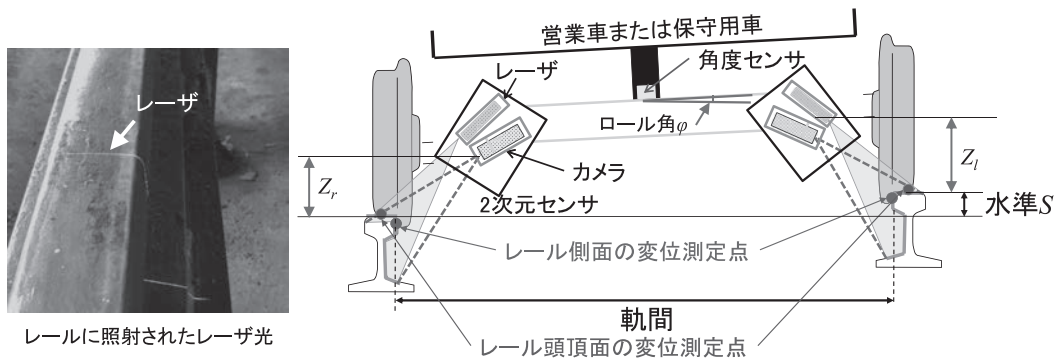


図-6 本装置による軌道変位の測定イメージ

る。測定点の検出方法については3章で述べる。軌間については、センサユニットとレール側面の変位測定点との相対変位より算出する。また、水準については、センサユニットとレール頭頂面の変位測定点との相対変位と角度センサで取得した装置の姿勢から求める。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。

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

なお、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、その後の計算により平面性変位を算出する。

(2) 本装置の結果出力画面の特徴

本装置による測定結果の出力画面を図-7に示す。本装置ではドップラーセンサからの信号を処理して車両の走行速度と走行距離(キロ程)を求め、一定間隔で軌道変位を測定する。出力画面では軌間・水準・平面性の測定値に加えて、レール断面形状とそのレール頭頂面及びレール側面の変位測定点が表示される。また、レール断面形状の画像から、画像処理により分岐

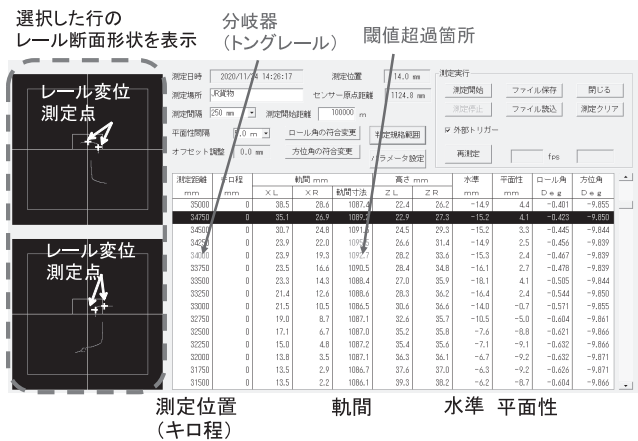


図-7 本装置の出力画面

器(トンゲレール)の位置を特定して、出力画面の測定距離の文字を赤色で表示する。これと、現場で管理している台帳と照合することによって、現場との位置合わせを行うことができる。

測定終了後に出力画面でファイルの読み込みを行い、測定位置を選択することにより、その位置のレール断面形状を確認できる。これにより、異常な測定値が得られた場合には、レール断面形状および軌道変位の算出に用いたレール変位測定点の位置を確認して、著大な軌道変位が存在するのかわ、それとも測定時のエラーによるものなのかを把握できる。なお、軌道変位の測定値が、予め設定した基準値等の閾値を超過した場合には測定値が赤字で表示される。

3. レール変位測定点の検出方法

本装置を車両に搭載して測定すると、2次元センサで取得した画像には、図-8のように測定レールの近傍に設置されているガードレールや踏切などの構造物や、雑草や太陽光などの外乱のノイズが含まれる。そのため、軌道変位を測定するためには、画像から測定レールを特定し、レール変位測定点を検出することが重要である。

本装置では、画像処理範囲の制限と画像の輝度値を併用してレール変位測定点の検出を行っている。検出方法の概念を図-9に示す。まず、測定開始地点の

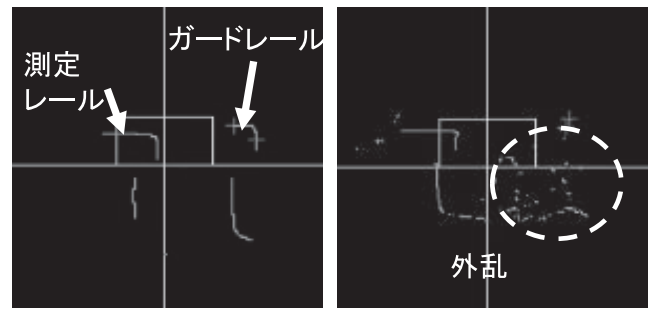


図-8 2次元センサで取得した画像の例

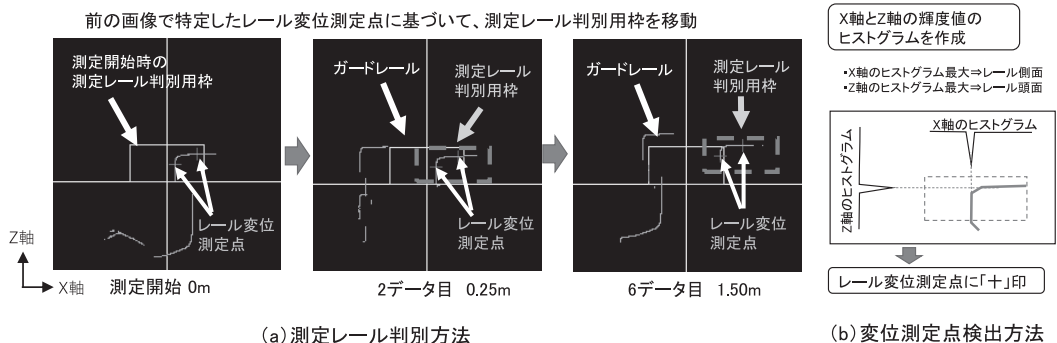


図-9 画像処理範囲の制限と画像の輝度値を併用したレール変位測定点の検出方法

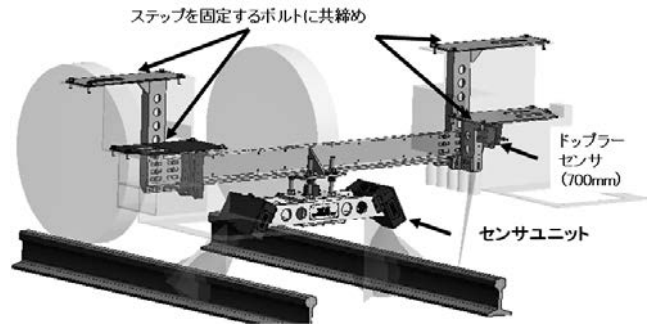
画像に対して、踏切ガード、脱線防止ガードなどのガードレールと測定レールとの設置間隔を考慮して、画像処理範囲の制限として測定レール判別用枠を設定する。次に、各画像の測定レール判別用枠においてX軸とZ軸のそれぞれの輝度値のヒストグラムを作成し、X軸のヒストグラムが最大となるピクセルをレール側面、Z軸のヒストグラムが最大となるピクセルをレール頭頂面としてレール変位測定点を検出する。2測点目以降の画像については、前の画像で特定したレール変位測定点がレール判別用枠の中心となるようにして枠の位置を移動させて画像処理範囲を設定し、枠内において輝度値のヒストグラムからレール変位測定点を検出する。これを各断面の画像に対して連続的に処理することで、測定レールの特定とレール変位測定点の検出を精度よく行うことができる。

4. 本装置の走行試験の概要

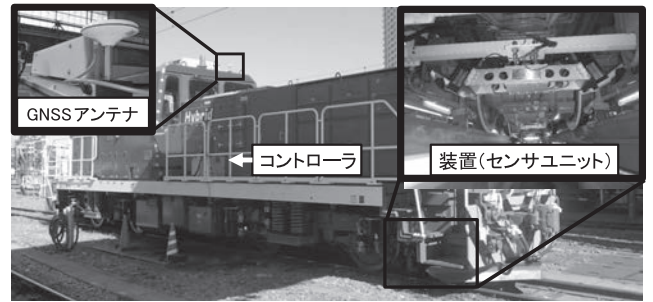
(1) 車両への搭載方法

車両走行時の動的な軌道変位を測定するには、本装置のセンサユニットを可能な限り車軸に近い位置に搭載する必要がある。軌道の補修作業等に使用されている車両への搭載方法（図-3 参照）と、図-10 に示す入換機関車への搭載方法を開発した。

入換機関車への搭載方法については、図-10 (a) の搭載用治具を使用して、治具の中央からセンサユニットを吊り下げる方式である。この方法でセンサユニットを取付けることで、入換機関車の車軸から約0.9 m の位置で軌道変位を測定できる。



(a) 入換機関車への搭載用治具のイメージ



(b) 入換機関車への搭載状況 (写真)

図-10 本装置の入換機関車への搭載方法

(2) 本装置の測定精度

本装置を入換機関車に搭載して走行試験を行い、測定精度を検証した。本装置による2回の測定結果と手押しの測定装置による測定結果との比較を図-11 に示す。なお、本装置による測定と手押しの測定装置による測定の時期は約4ヶ月ずれているが、その間に軌道の補修作業は行われていない。

本装置と手押しの測定装置の測定結果については、本装置が連続した等間隔の測定結果であるのに対し、

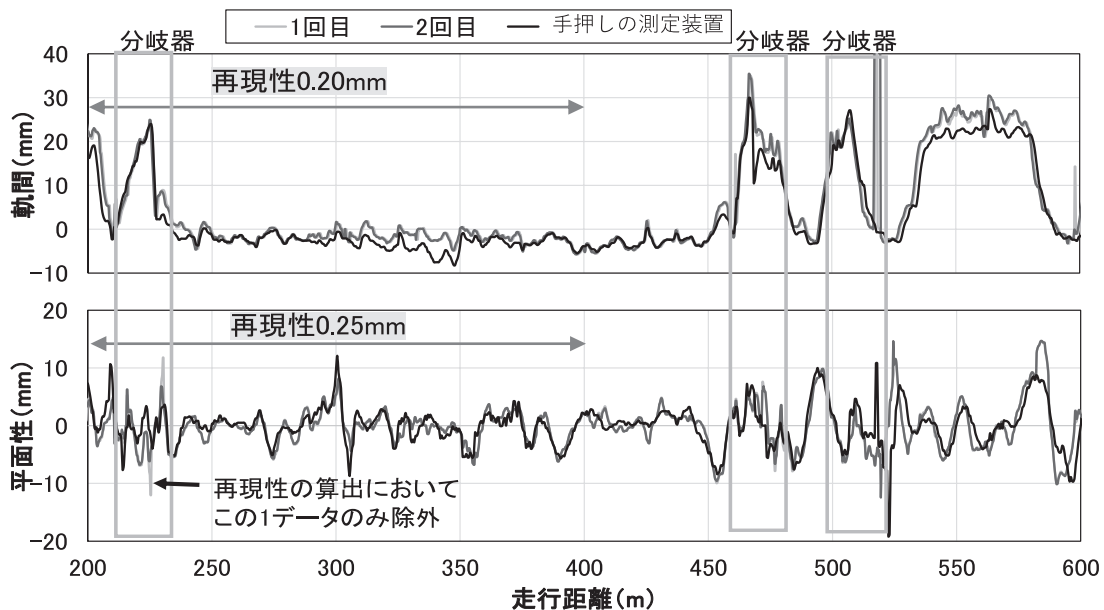


図-11 本装置と手押しの測定装置で測定された軌道変位の比較

手押しの測定装置は分岐器部で分割して測定した結果であるため、わずかな位置のずれはあるが、軌間、平面性ともに概ね整合していることが確認できる。

本装置の2回の測定結果については、同区間には分岐器や踏切が存在するが、レールの誤認識は発生しておらず、ほぼ重なっていることがわかる。そこで、本装置の測定精度を再現性で評価する。再現性は、同じ装置で、同時期に同区間を測定した2つの測定結果の一致度のことであり、軌道検測においては差の標準偏差を意味する。在来線用の軌道検測車に要求される再現性は、一般には200 mの標準偏差で求められることが多く、軌間は0.5 mm、平面性変位は1.0 mmである。本装置に測定結果については、軌道変位を測定できない分岐器のクロッシング欠線部の1データのみを除いて再現性を算出した結果、軌間は0.20 mm、平面性変位は0.25 mmであり、在来線用の軌道検測車と同等の精度を有していることを確認した。なお、軌道検測車の測定値とも概ね整合することを確認している。

5. 本装置のその他の機能

ここでは詳細は述べないが、本装置の実用性能を向上するために、以下の機能を開発した。

(1) 全球測位衛星システム(GNSS: Global Navigation Satellite System) による測定位置の把握法³⁾

本装置の活用を想定している貨物ヤード、車両基地、地域鉄道事業者の路線において、車両が走行した経路や区間を把握するため、図10(b)のように車両の屋根上にGNSSのアンテナを設置して、RTK方式による測位を活用した測定位置の把握法を開発した。走行試験により測位精度を検証した結果、衛星からの信号を受信しやすい環境では測定位置検出誤差は25 cm以下であり、測定位置の把握に有効であることを確認した。

(2) 本装置の遠隔操作法

本装置の無人での測定を実現するために、携帯電話回線を使用した閉域モバイル網を構成し、複数のSIMカード同士の通信が可能なVPNネットワークによる遠隔操作機能を追加した。走行試験で本機能の動作確認を行い、事務所から検測開始・終了および検測データの取得ができることを確認した。

6. おわりに

脱線事故のさらなる低減を目的として、軌道検測車よりも低コストに軌間と平面性変位の動的値を測定できる、車両搭載型の動的軌間・平面性測定装置を開発した。本装置を入換機関車等に搭載する方法を開発して、走行試験により測定精度を検証した結果、在来線の軌道検測車と同等の精度で、軌間と平面性変位を測定できることを確認した。

本装置は軌道変位の測定項目を限定しているため、従来の軌道変位検査の置き換えにはならないが、GNSSによる測定位置の把握法や遠隔操作方法を活用して、車両を用いた普段の作業に合わせて測定することにより、脱線に対する安全性を効率的に向上できる。

JCMA

《参考文献》

- 1) 坪川洋友, 石川智行, 塩野幸策: 保守用車に搭載可能な動的軌間・平面性測定装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.31, No.12, pp.47-52, 2017.10
- 2) 石川智行, 坪川洋友: 動的軌間・平面性測定装置の開発と性能検証試験, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.22, pp.55-61, 2018
- 3) 坪川洋友, 石川智之: 衛星測位システムを活用して軌道の検査位置を把握する, RRR, Vol.77, No.9, 2020.9

【筆者紹介】

坪川 洋友 (つばかわ ようすけ)
 (公財)鉄道総合技術研究所
 軌道技術研究部 軌道管理研究室
 主任研究員

