

## 画像データと軸箱加速度を用いた継目状態評価に関する検討

山根 悠司\* 松本 麻美 坪川 洋友 (鉄道総合技術研究所)

A Study on Rail Joint Condition Evaluation Using Image Data and Axle-Box Acceleration.

Yuji Yamane\*, Mami Matsumoto, Yosuke Tsubokawa, (Railway Technical Research Institute)

At rail joints which are weak points in track structures since wheel loads increase impulsively when trains pass, fish bolts tightening rail joint bar have a tendency to lose containing coming off. However, it is difficult to detect such defects in the rail joints based on track irregularity data, so that the detection is one of important issues in track maintenance. Therefore, we evaluated the effects of misalignment of the rail joint and loosening of fish bolt on the axle-box acceleration. Using the obtained results, we developed a method with image data in addition to axle-box acceleration to efficiently grasp the status of joints for maintenance.

キーワード：継目，軸箱加速度，遊間，段違い，重回帰分析

(rail joint, axle-box acceleration, joint gap, unevenness in height at joint, multiple regression analysis)

### 1. はじめに

軌道構造上の弱点箇所の一つとして、レールとレールの繋ぎ目（以下、継目という）があげられる。この継目では、列車通過時に衝撃的に輪重・横圧が増加するため、継目板ボルトの緩みや脱落（以下、締結不良という）が生じやすい。また、継目の状態を表す主な指標として、遊間・目違い・段違い・角折れがあげられる（以下、継目状態という）。遊間とは、レールの温度による伸縮を考慮するために設けるレール間の隙間のことである。また、継目を挟んだ両側レール端部の断面形状が摩耗などによって異なる場合、左右方向の段差を目違いといい、上下方向の段差を段違いという。また、角折れとはレール端部で曲率に応じた塑性変形によるわん曲が得られていないために、レールが直線に近い形状となることでレール継目部に生じる角度である<sup>(1)</sup>。これらの継目状態と列車の走行安全性等に関する知見として、目違いや角折れにより、局所的に車両走行時の横圧が増加することで乗り上がり脱線に影響を及ぼす要因の一つとなる<sup>(1)</sup>ことや、遊間や段違いが、継目の衝撃的な輪重に影響を及ぼす<sup>(2)</sup>ことが知られている。

しかし、これらの継目状態や継目板ボルトの締結不良は軌道変位データには現れにくいと、鉄道事業者では保線作業員が現地で目視等の確認により継目の保守管理を行っており、これに多大な労力を要している。

一方、軌道検測車等で測定されている軸箱加速度と輪重・横圧には一定の相関があることが知られている。また、近年では軌道のメンテナンスの省力化を目的として、車両床下に設置したカメラにより高精度な床下画像データ等の取得が可能となっており、継目の状態把握についても

活用できると考えられる。

そこで本研究では、継目に与える列車荷重のうち、輪重との相関がある上下軸箱加速度（以下、軸箱加速度という）について、床下画像データから測定した遊間及び段違いが軸箱加速度に与える影響を分析した。また、継目板ボルトの締結不良が軸箱加速度に与える影響を分析することで、より効率的な継目の状態評価を検討した。

### 2. 継目状態と軸箱加速度の分析

#### 〈2.1〉 分析データ

分析対象とした線区は、PCまくらぎ、バラスト軌道の定尺区間であり、年間通過トン数は約 430 万トン、線区最高速度 85km/h、貨物車両の走行は無い単線である。

本分析では、車両床下に設置したカメラで撮影した継目の床下画像及び床下画像の処理システムにより得られた画像データにより、遊間及び段違いを目視で測定した。測定箇所は図 1 に示すとおり、遊間はレール頭頂面のゲージコーナー側のレール間の隙間を測定した。また段違いはレール頭頂面の中央部において、起終点それぞれのレール端部から 2cm 離れた箇所の高さの差を測定した。また、段違いのうち進行方向手前側のレール頭頂面に対して、奥側のレール頭頂面が高い場合を上り段違いとし、低い場合を下り段違いとした。

また、床下画像による遊間及び段違いの測定例を図 2 に示す。なお画像データの分解能は、遊間については 0.1mm、段違いについては 1.0mm である。また、画像データでは 3 次元の位置情報を有しており、図 2(b)のような上面からの画像でも上下方向の測定が可能である。

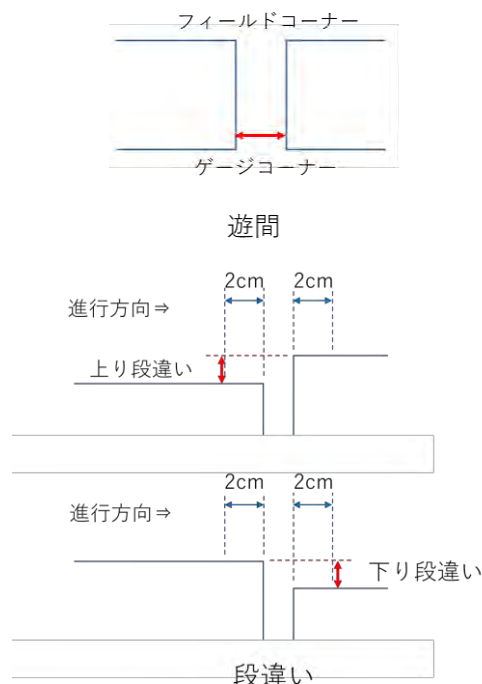


図 1 遊間及び上り段違い・下り段違いの測定箇所

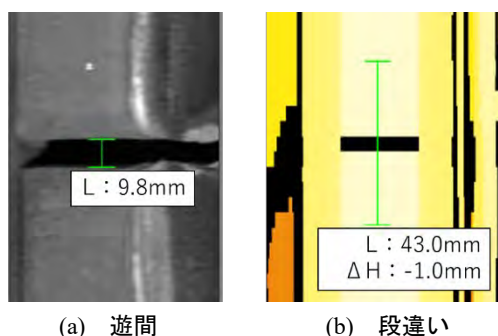


図 2 床下画像による遊間及び段違いの測定例

分析対象とする継目は、直線区間で、且つ軸箱加速度を測定する車両の通過速度が 40km/h 以上のものから選定した。これは、走行速度が低いほど測定軸によって車輪の接触位置が一定でなく、軸箱加速度の検出精度のばらつきが大きくなることから、その影響を除外するためである。以上の条件により選定した継目は 119 箇所であり、左右レールとも測定を行ったことから、合計 238 継目のサンプルが得られた。

なお、軌道検測車走行の 2 日後に床下画像を撮影した車両が走行しており、画像データは夜間に、軸箱加速度は昼間に取得したものである。そのため、それぞれのデータを取得した際の気温が異なることから、遊間量は異なっている可能性が大きいと考えられる。

## 〈2.2〉 分析手法

軸箱加速度データの処理方法として、軌道保守管理データベース（以下、LABOCS という）を用いた。LABOCS による軸箱加速度の処理手順として、測定データを分解し、時間軸サンプリングデータを距離軸サンプリングデータに変換し、地上との位置（キロ程）を補正した。また、本システムでは、バンドパスフィルタ（以下、BPF という）の設定に応じた軌道状態の波形を抽出することができるが、本分析では、継目の劣化に対応する波長として、0.05～0.5m の短波長の BPF を設定した。

また、軸箱加速度を用いた継目の状態評価として、重回帰分析を用いて継目の状態評価を実施した。重回帰分析は、二つ以上の説明変数が目的変数に与える影響を分析する手法であり、重回帰分析で推定された係数の値から各説明変数の影響の大きさを判定することができる。今回は、遊間及び段違いを説明変数、継目を中心とした 25m 区間における軸箱加速度の最大値と最小値の差（以下、pp 値という）を目的変数とした重回帰分析を実施した。具体的には、説明変数の影響の大きさを示す t 値、回帰式によって得られた係数の有意性を持つ P-値、各項目と軸箱加速度の相関を表す相関係数 R によって、軸箱加速度の影響の大きさを評価する。一般的に、t 値は絶対値が 2 以上であれば、その説明変数は目的変数への影響があることを示す。また、P-値が 0.05（5%）未満であれば、その説明変数は目的変数に対して有意である（関係性がある）と判断できる。また、相関係数 R は 0 から 1 の範囲に値を取り、1 に近いほど相関係数が大きいことを示す。

## 〈2.3〉 分析結果

重回帰分析した結果を表 1 に示す。表 1 より、t 値については、遊間では 2.35、上り段違いでは 2.27 と、目安値の 2 を上回っていることが確認できた。また、P-値については、遊間では 2.1%、上り段違いでは 2.5%と 5%未満であり、遊間量及び上り段違いが軸箱加速度に与える影響が有意であると考えられる。

また、遊間・上り段違い・下り段違いと軸箱加速度 pp 値の関係をそれぞれ図 3 に示す。図 3 より、各状態の相関係数 R は、遊間では 0.23、上り段違いでは 0.22、下り段違いでは 0.03 となった。これより、遊間及び上り段違いが、下り段違いに比べると、軸箱加速度との相関があることが確

表 1 軸箱加速度を目的変数とした重回帰分析結果

項目	係数	標準誤差	t 値	P-値
遊間	0.94	0.40	2.35	0.021
上り段違い	9.71	4.27	2.27	0.025
下り段違い	3.04	3.39	0.90	0.373

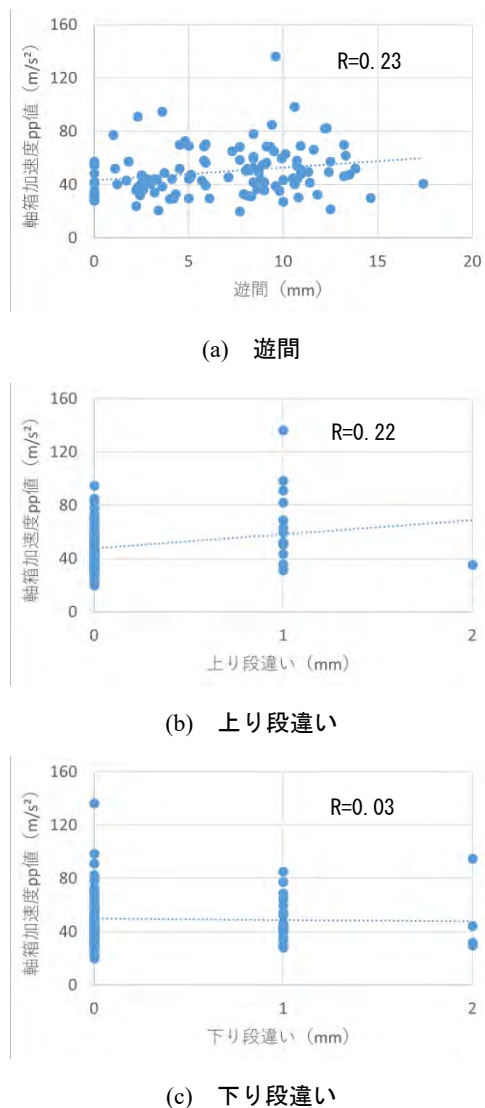


図 3 各継目状態と軸箱加速度 pp 値の関係

認できた。一方で、図 3 より、遊間・上り段違い・下り段違いが 0mm の箇所があるにも関わらず大きな軸箱加速度が発生している箇所があったことから、各状態が箱加速度に与える影響について詳細な分析をする必要があると考えられる。

### 3. 継目板ボルトの締結不良と軸箱加速度の分析

#### (3・1) 試験概要及び分析データ

分析対象とした線区は、木まくらぎ・PCまくらぎが混在し、バラスト軌道の定尺区間であり、年間通過トン数は約 40 万トン、線区最高速度は 85km/h、貨物車両の走行が無い単線である。

本試験では、継目板ボルトの締結不良に対する軸箱加速度の影響を分析するため、軌道検測車の走行に合わせて試

験的に継目板ボルトを撤去し、その時の軸箱加速度を分析した。以降では、正常な継目とは 4 本の継目板ボルトが締結されている継目、不良な継目とは 4 本のうち 1 本の継目板ボルトを撤去した継目とし、一つの継目に対して、軌道検測車の往路と復路で、それぞれ正常な継目と不良な継目の状態にし、軌道検測車が走行したときの軸箱加速度を測定した。

分析対象とする継目は直線区間であるが、撤去する継目板ボルト箇所は継目ごとに変えており、第 1 ボルトを撤去した継目は 13 継目、第 2 ボルトでは 12 継目、第 3 ボルトでは 13 継目、第 4 ボルトでは 12 継目の、計 50 継目を対象とした。なお、継目板ボルトの位置は、起点から終点に向かって第 1 ボルト、第 2 ボルト、第 3 ボルト、第 4 ボルトとした (図 4 参照)。

#### (3・2) 分析手法

測定した軸箱加速度データについて、2 章と同様に、LABOCS を用いた軸箱加速度のデータ処理を実施し、BPF は 0.05~0.5m の短波長の BPF を設定した。また、頻度分布により、正常な継目及び不良な継目の軸箱加速度を比較した。

#### (3・3) 分析結果

図 5 に、正常な継目と不良な継目における軸箱加速度の波形を示す。これより、正常な継目及び不良な継目で局所的に軸箱加速度が大きくなっていることが確認できた。また、不良な継目と正常な継目の軸箱加速度の波形を比較した結果、個々の継目によっては、正常な継目の軸箱加速度 pp 値が不良な継目よりも大きい箇所を確認できたが、試験区間全体として、正常な継目よりも不良な継目のほうが軸箱加速度の pp 値が大きくなる傾向を確認できた。

次に、継目を中心とした 25m 区間における、軌道検測車の平均速度と軸箱加速度 pp 値との関係を図 6 に示す。図 6(a)は正常な継目、図 6(b)は不良な継目を示しており、正常な継目では、平均速度が 40~50km/h 付近で軸箱加速度 pp 値が 60~120m/s<sup>2</sup> 付近に集中している傾向にあったが、不良な継目では、同速度帯で軸箱加速度 pp 値が 60~180m/s<sup>2</sup> 付近に集中している傾向にあった。

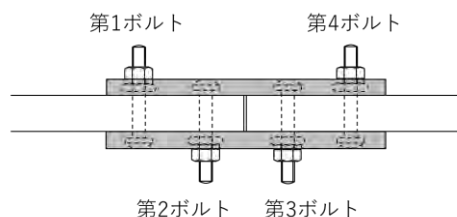


図 4 継目板ボルトの位置

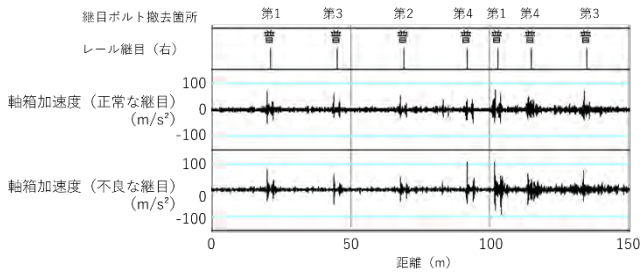
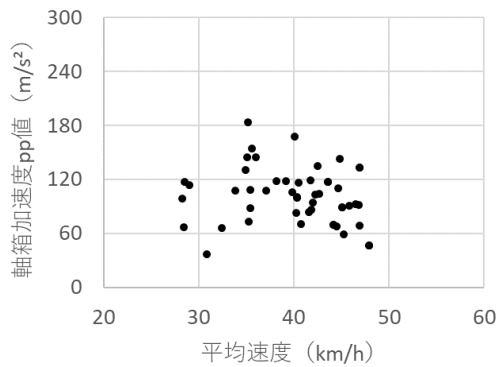
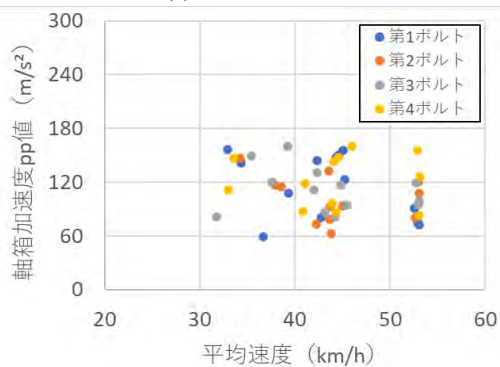


図 5 軸箱加速度の波形



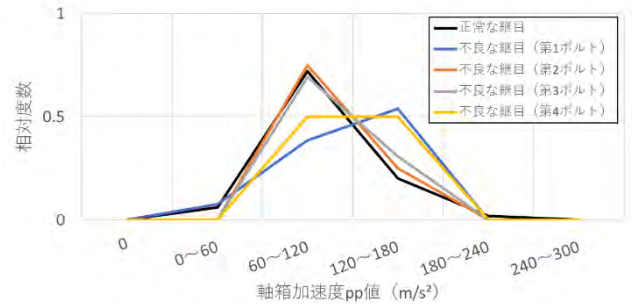
(a) 正常な継目



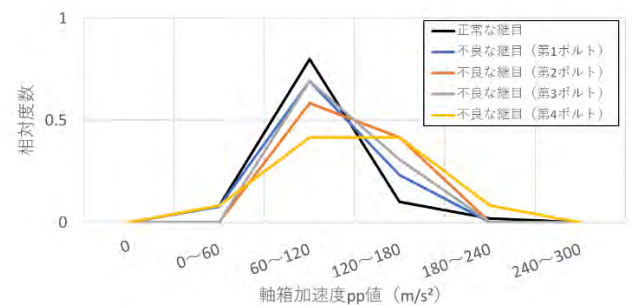
(b) 不良な継目

図 6 速度と軸箱加速度 pp 値の関係

また、軸箱加速度 pp 値の頻度分布を図 7 に示す。図 7 (a) は右レールを検測した軸箱加速度、図 7 (b) は左レールを検測した軸箱加速度を示し、それぞれ横軸を  $60\text{m/s}^2$  ごとの軸箱加速度 pp 値、縦軸を相対度数とする。図 7 より、軸箱加速度 pp 値について、正常な継目では、 $60\sim 120\text{m/s}^2$  の頻度が大きいことが確認できた。一方、不良な継目でも、 $60\sim 120\text{m/s}^2$  の区間で軸箱加速度 pp 値の頻度が大きい傾向があるが、 $120\sim 180\text{m/s}^2$  の区間では、正常状態の継目よりも頻度が大きいことが分かった。特に、右レールの不良な継目のうち第 1 ボルト及び第 4 ボルトを撤去した継目では、その傾向が顕著に表れていることが確認できた。この結果から、ばらつきはあるものの、不良な継目では正常な継目に



(a) 右レール



(b) 左レール

図 7 軸箱加速度 pp 値の頻度分布

比べて軸箱加速度が大きくなる傾向にあった。

#### 4. まとめと今後の課題

本研究では、重回帰分析による継目の状態評価を実施した結果、遊間及び上り段違いが波長  $0.05\sim 0.5\text{m}$  で BPF 処理した軸箱加速度と影響があることが分かった。今後は、継目に与える列車荷重のうち、横圧との相関がある左右軸箱加速度への影響について、遊間及び目違いが左右軸箱加速度に与える影響を分析する。そのほか、測定条件や曲線条件に応じた継目状態を評価する。

また、締結不良について、継目板ボルト 1 本を撤去した不良な継目と正常な状態の継目を比較した結果、軸箱加速度が  $120\sim 180\text{m/s}^2$  の範囲で、不良な継目の軸箱加速度の頻度が正常な継目と比べて大きくなる傾向にあった。今後は、締結不良における遊間等の継目状態が軸箱加速度に与える影響や、継目板ボルトが折損した状態における軸箱加速度への影響についても検討する。

#### 文 献

- (1) 西本正人, 山口剛志: 列車荷重の変動成分の推定と脱線への影響に関する考察, 第 21 回鉄道技術連合シンポジウム (2014)
- (2) 西本正人, 山口剛志: 列車荷重の継目部衝撃成分推定に関する検討, 第 20 回鉄道技術連合シンポジウム (2013)
- (3) 田中博文, 松本麻美, 原田祐樹, 桶谷栄一: 軌道検測車で測定される軸箱加速度を活用したレール波状摩耗の状態評価と管理手法に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 63A (2017)