

波状摩耗管理のための可搬型レール凹凸連続測定装置の実用化

田中 博文* 清水 惇**

Practical Application of Rail Surface Roughness Continuous Measurement Trolley for Maintenance of Rail Corrugation

Hirofumi TANAKA Atsushi SHIMIZU

The rail corrugation causes not only causing of noise and vibration but also deterioration of track irregularity and track material. Therefore, it is necessary to manage the rail corrugation appropriately. Currently, the rail surface roughness due to the rail corrugation has been managed with a visual inspection or a simple device. In this regard, we have developed “Rail surface roughness continuous measurement trolley” that aims at clarification of the generation mechanism of the rail corrugation and its efficient management. This trolley adopts the asymmetrical chord offset method for measuring the rail surface roughness continuously. Further, we have developed the software for controlling this trolley and processing the measured data. In this paper, we report the details of our development and the usage example of this trolley.

キーワード：波状摩耗，レール削正，レール凹凸，連続測定，偏心矢

1. はじめに

レール波状摩耗は、車両の繰返し走行に伴ってレールの長手方向に連続的に発生する周期的な凹凸である。この波状摩耗は、車両走行に伴い沿線に著しい騒音・振動を引き起こすのみならず、励起された振動によって軌道変位進みを助長したり、軌道部材の劣化を引き起こしたりすることがわかっている。図1に、一例として、バラスト軌道の100mロット高低変位の標準偏差(σ 値)の推移を示す。図中には、内軌に波状摩耗が発生していた半径400mの曲線区間のロットと、当該曲線近傍の波状摩耗が発生していない直線区間のロットを示している。同図より、波状摩耗が発生していた曲線区間では軌道変位進みが早く、1回目のMTT施工後すぐに軌道状態が悪化しているのに対し、波状摩耗が発生していない直線区間では軌道変位進みは緩やかである。また、曲線区間において、1回目のレール削正施工後に実施した2回目のMTT施工後には軌道変位進みは緩やかとなり、直線区間と同程度となっていることがわかる。このことから、波状摩耗の管理は、軌道保守量削減の観点からも重要であることがわかる。また、近年では波状摩耗区間を走行する際の車内騒音も管理すべき対象として認識されつつある。

ここで、レール波状摩耗を管理するためには、その発生状況を把握する必要があると考えられる。そのために各種研究開発が行われている。例えば、間接的な物理量を測定する方法としては、軌道検測車で測定された軸箱

* 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 九州旅客鉄道株式会社)

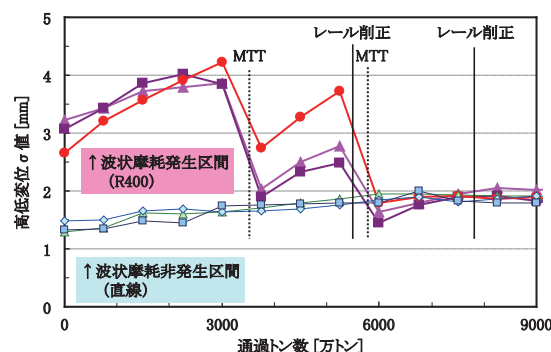


図1 波状摩耗の有無と高低変位の σ 値の推移

加速度を活用する手法¹⁾や、営業車で測定可能な車内騒音を活用するモニタリング装置²⁾³⁾がある。一方、レール凹凸を直接測定する装置として、ヨーロッパでは複数の装置が実用化されている。例えば、2次差分法の原理を用いた車載タイプ⁴⁾のものや、慣性法の原理を用いたトロリータイプ⁵⁾のものがある。この他にも、海外では様々なタイプのレール凹凸を連続測定する装置が開発、商品化されている。

日本では、保守用車牽引タイプのレール凹凸連続測定装置⁶⁾は実用化されていたが、簡易に持ち運び可能な装置はなかった。そこで、本研究では地上で連続的にレール凹凸を測定する手法について検討し、可搬型のトロリータイプの装置を開発した⁷⁾⁸⁾。さらに、本装置の制御および簡易なデータ処理を行うためのソフトウェアを開発した。以下、開発した装置およびソフトウェアの概要、および本装置を活用したレール波状摩耗の効率的な管理手法について述べる。

2. レール凹凸連続測定装置の概要

図2に、筆者らが開発した「レール凹凸連続測定装置」の外観を示す。本装置は、可搬型のトロリーである。表1に、主な仕様を示す。運搬時は装置を分解してアルミトランクに収納し、測定時に組み立てて使用する。なお、試作1号機⁷⁾⁸⁾ではノートパソコンを搭載していなかったが、試作2号機では今回の実用化に当たりソフトウェアを開発し、これを実装するために新たに搭載した。このソフトウェアの概要については、3章で述べる。

2.1 装置の測定原理と主な機構

「レール凹凸連続測定装置」は、図3に示すように4台のレーザー変位センサで構成された2組の偏心矢によってレール凹凸を測定するものである。通常、偏心矢を構成するには3つの変位センサで良いため、本装置では通常時は測定方向に応じて偏心矢の短弦あるいは長弦が先行するように3つのセンサの出力を用いてレール凹凸を演算しており、残りの1台は使用しない。そのため、4台のうち1台のセンサが故障しても、偏心矢を構成するセンサおよび演算式を変更すれば正常に測定可能な冗長性を有している。

偏心矢の配置は、検測特性が0となる波長帯域を無くし、かつ在来線の一般的な波状摩耗の波長帯域である数十～数百mmでの検測倍率が高くなるように検討した結果、本装置では25mm - 230mm 偏心矢を採用した。図4に、25mm - 230mm 偏心矢の検測特性を示す。同図より、波長25mmでは検測倍率が0.115となるものの0となる波長帯はなく、かつ波長27～700mmの範囲で検測倍率が0.2以上となっており、在来線で発生する一般的な波状摩耗を概ね把握できることになる。

なお、本装置は、レール波状摩耗の凹凸上を移動しながら測定するため、大きな振動にさらされる。そのため、レーザー変位センサを搭載した測定基準ばりを2重のサスペンションで支持し、振動低減策を施している。

また、レール波状摩耗は、内軌の頭頂面のみでなく、



図2 レール凹凸連続測定装置（試作2号機）の外観

表1 装置の主な仕様（試作2号機）

大きさ	(運搬時) 約 750mm × 400mm × 400mm (組立後) 約 600mm × 500mm × 軌間 + 100mm
総重量	45kg
電源	バッテリー (DC10V)
連続稼働時間	10 時間以上
測定原理	偏心矢 (25mm-230mm 弦)
測定可能波長	27 ~ 700mm (検測倍率 0.2 以上)
測定分解能	(レール凹凸方向) 0.001mm (センサの分解能) (レール長手方向) 1mm (プログラム上で任意に変更可能)
測定可能範囲	レール断面方向に ± 20mm
その他	狭軌/標準軌対応可能 絶縁仕様 (短絡仕様対応可能) 任意位置でのマーカー入力可能 制御・データ処理のためのノート PC 搭載

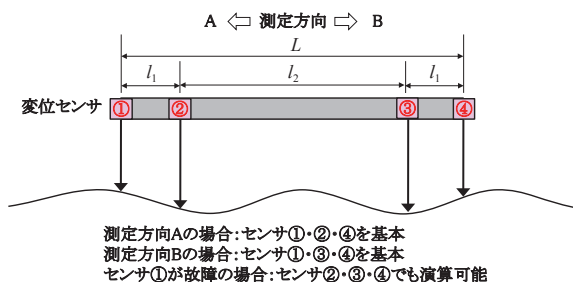


図3 変位センサの配置

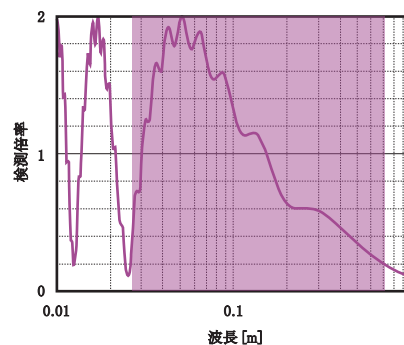


図4 25mm - 230mm 偏心矢の検測特性

外軌のゲージコーナーにも発生することが知られている。これらに対応するため、本装置では、測定基準ばりをレール断面方向にレール中心から ± 20mm の範囲で任意の位置に調整できる機構を有している。

2.2 レール凹凸の演算

図5に、測定データの処理フローを示す。まず、データレコーダーには、偏心矢を構成する3つの変位センサの測定値およびロータリーエンコーダーから発生した等距離パルス、任意の位置で入力されたマーカーパルスが時間軸上のデータとして収録される。

次に、収録データは、まず、データのこう正を行うと共に、ローパスフィルタによるノイズ除去を行う。次に、等距離パルスを用いて、変位センサの測定値を距離軸上の等間隔データに変換する。本装置では、5mmの等距離パルスを用いており、プログラム上で1mmサンプリングのデータを出力している。なお、プログラムを変更すれば、任意の等間隔での距離軸上のデータに変換することも可能である。

ここで、距離軸上のデータに変換されたデータは、まず式(1)を用いて偏心矢演算を行う。次に、式(2)の検出特性の逆フィルタを用いて復元処理を行うが、その際、偏心矢演算結果には、波長の長い軌道変位および波長の短いレール凹凸の成分に加えて、装置の振動の影響が含まれている。そのため、復元処理の際に、不要となる波長の長い軌道変位の成分および装置の振動の成分を除外するように復元帯域を設定し、周波数分析の入力データとする。その周波数分析結果をもとに、波状摩耗の波長を特定し、最適なバンドパスフィルタにより、波状摩耗の抽出処理を行う。最後に、距離化したマーカーパルス、あるいは変位センサの出力に含まれる継目通過時のノイズを用いて位置補正を実施し、波状摩耗のレール凹凸データが得られる。

偏心矢測定量 $z(x)$ は2次差分の原理により、式(1)で表わされる。

$$z(x) = \left\{ \frac{b}{a+b} \cdot z_1(x-a) + \frac{a}{a+b} \cdot z_3(x+b) - z_2(x) \right\} \quad (1)$$

ここで、 a ：短弦長、 b ：長弦長

$z_{1\sim 3}(x)$ ：変位センサ①～③の測定値

次に、偏心矢の検出特性 $|H(f)|$ は、式(2)で示される。この検出特性の逆特性を持つフィルタを式(1)で求められた偏心矢測定量 $z(x)$ に施す復元処理によってレール凹凸が得られる。

$$|H(f)| = \left\{ \left((1 - \beta \cos(2\pi af) - \alpha \cos(2\pi bf))^2 + (\beta \sin(2\pi af) - \alpha \sin(2\pi bf))^2 \right)^{0.5} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $\alpha = \frac{a}{a+b}$ 、 $\beta = \frac{b}{a+b}$ 、

f ：空間周波数

2.3 装置の精度検証結果

試作した装置の再現性確認試験を営業線で実施した。再現性確認の方法は、本装置が偏心矢法を採用していることから、同一区間を短弦先行と長弦先行で複数回測定し、波形の差の標準偏差を再現性誤差と定義し、評価することとした。その際、同一方向での比較に加え、偏心矢の弦長等の寸法的な製作誤差が測定精度に与える影響も検討するため、異なる検測方向でも比較した。

試験区間は、半径185m、カント105mmの急曲線で

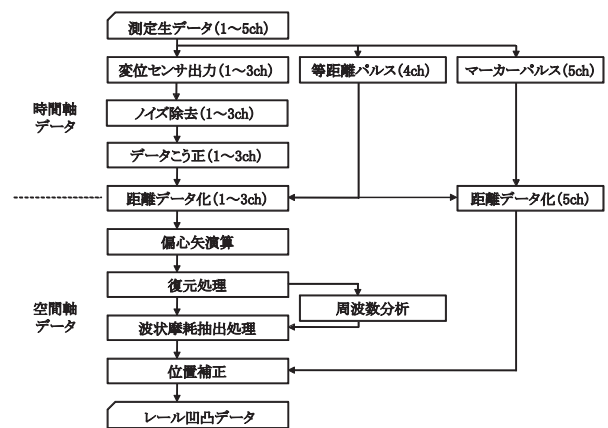
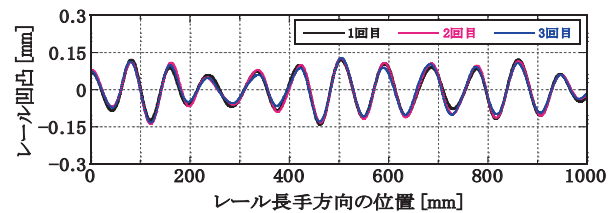
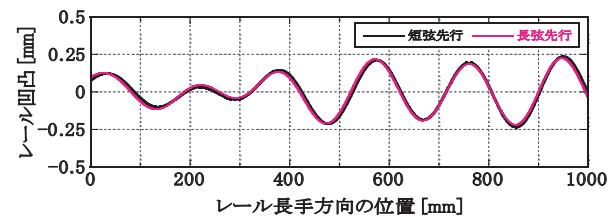


図5 測定データの処理フロー



(a) 内軌波状摩耗（短弦先行，レール中心）



(b) 外軌波状摩耗（レール中心よりGC側に20mm）

図6 精度検証のためのレール波状摩耗の測定例

あり、内軌の頭頂面および外軌のゲージコーナーに波状摩耗が発生している区間である。

図6(a)に、内軌波状摩耗の測定結果の一例として、内軌のレール中心について、同じ区間を短弦先行で3回測定した際のレール凹凸の波形を示す。各波形には、波長40～150mmでバンドパスフィルタ（以下、「BPF」という）処理を施している。同図より、短弦先行時のレール凹凸波形に高い再現性が見られる。また、図示していないが短弦先行と長弦先行のレール凹凸波形を比較しても高い再現性があった。

次に、図6(b)に、外軌波状摩耗の測定結果の一例として、外軌のレール中心からゲージコーナー側に20mmの位置について、同じ区間を往復測定した際のレール凹凸の波形を示す。各波形には、波長150～300mmでBPF処理している。同図より、長弦先行と短弦先行のレール凹凸波形を比較して、高い再現性があることがわかる。

なお、これらを含む様々な条件での測定結果の再現性誤差を算出した結果、同一検測方向では0.010mm程度、

特集：軌道技術

異なる検測方向では0.015mm程度であった。ここで、使用したレーザー変位センサ単体での繰返し精度はメーカー公称で0.002mmとされている。これと比較して、本装置の再現性誤差は、大きくなっているが、波状摩耗の凹凸は一般的に0.2～0.3mm程度、大きいものでは0.5mmを超えるものもあることから、本装置は、実用上十分な再現性を有していると考えられる。

3. ソフトウェア開発による実用化

3.1 ソフトウェアの必要性

本装置は、レール波状摩耗の発生原因解明のために、試験研究目的で開発を行ってきたものである。そのため、基本的には現地での測定データ処理は想定しておらず、軌道保守管理データベースシステム「LABOCS」⁹⁾による専用の処理プログラム（バッチファイル）を用いてオフラインでデータ解析を行ってきた。しかしながら、本装置の実用化にあたっては、現場で簡易に測定データを確認し、かつ測定装置そのものの制御を一括して行えるソフトウェアが必要であると考え、LABOCSをベースとしWindowsOS上で動作するソフトウェアを開発した。

3.2 開発したソフトウェアの概要

図7に、開発したソフトウェアの画面を示す。本ソフトウェアは、測定装置制御機能、測定データ処理・表示機能および動作状態確認機能からなる。

測定装置制御機能では、測定前に①線区、②線別、③レール左右、④開始キロ程、⑤装置方向、⑥測定方向の計6項目をプルダウンメニューあるいはキーボードから入力する。その後、「測定開始」、「測定終了」をクリックすることによって測定作業が実施される。なお、測定終了をクリックすると、自動的にデータ処理が実行される。この機能によって、従来の装置で測定の際に行っていたデータレコーダーの直接操作が不要となるとともに、測定データには入力した情報が記録されるため、データシートとの関連付けが容易となった。

また、データレコーダーとノートパソコンとの接続状況、各センサからのデータの入力状況、エンコーダーの出力を用いた累積測定距離および現在の測定速度が表示されるので、測定途中の装置の動作状態を随時確認することが可能となった。

データ処理・表示機能では、測定されたレール凹凸データの波形処理および周波数分析、加えてそれらの表示および出力が可能である。

図8に、処理されたレール凹凸波形の表示例を示す。本ソフトウェアでは、表2に示す事前に準備された波長帯域を選択し、あるいは任意のBPFを設計可能であるので、発生している波状摩耗の波長に適合したフィル



図7 ソフトウェアの画面および機能説明

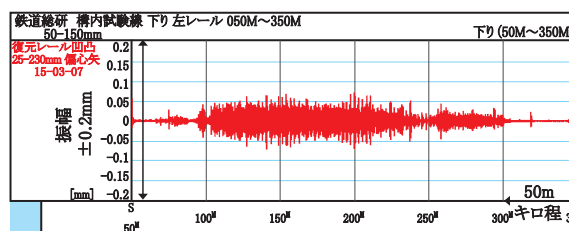


図8 波形表示の一例（50～150mmでBPF処理）

表2 事前に準備されたBPFの一例

名称	抽出帯域
A	30～100mm
B	50～150mm
C	50～200mm
D	100～300mm
E	200～400mm
F	300～1000mm
G	40～1250mm

タを用いて、横軸がキロ程のレール凹凸のチャートを表示可能である。なお、表2中のA, D, FのフィルタはEN13231-3¹⁰⁾に準拠したフィルタである。図8の例は、波長50～150mmでBPF処理した結果である。

なお、BPFの設計においては抽出したい波長帯域、フィルタの遷移帯域の両端および次数の設定が必要となる。これに対し、本ソフトウェアでは、デジタルフィルタ処理の専門的な知識を有さないユーザーを想定し、抽出したい波長帯域のみを入力すれば、その他のパラメーターは自動で設定され、最適なフィルタが設計される機能を有している。これらの機能によって、測定データに最適なフィルタ処理を施し、波状摩耗の発生状況を簡易に把握することを可能とした。また、フィルタ処理されたデータは、任意のキロ程を指定、あるいはレール凹凸のスケールを調整し、容易に表示を変更可能である。

図9に、レール凹凸の周波数分析結果の一例を示す。本ソフトウェアでは、任意の区間のキロ程を指定し、パワースペクトルを算出できる。パワースペクトルの横軸は空間周波数であり、ピークが認められる空間周波数の

逆数が波状摩耗の波長に相当する。図9の例の場合、空間周波数10[1/m]にピークが見られることから、波長0.10mの波状摩耗が発生していることがわかる。この機能によって、指定した区間に発生している波状摩耗の波長を把握することが可能となった。

なお、図8および図9は、LABOCS ベースのチャートおよびスペクトルであるが、テキスト形式でのファイル出力機能を有しており、任意の表計算ソフトでのデータ編集も可能となっている。

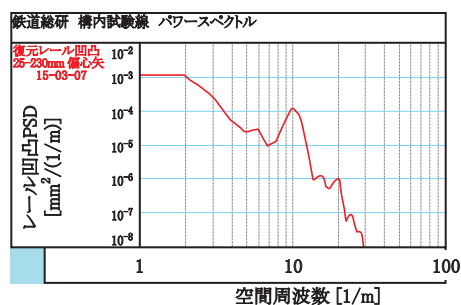


図9 レール凹凸の周波数分析結果の一例

3.3 ソフトウェアの活用例

本ソフトウェアにより、現場でレール波状摩耗の発生状況を把握可能となった。これによって、例えば、レール削正の施工前および施工途中のレール凹凸の推移を測定することによって、効率的なレール削正作業の計画および施工が可能になると考えられる。また、レール削正の施工前後で測定することによって、仕上がり確認作業にも活用が期待される。また、オフラインでのデータ処理にも対応しており、定期的に測定されたデータについての分析等にも活用可能である。

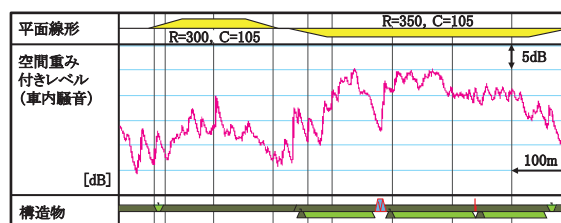


図10 車上モニタリング結果の一例

4. レール波状摩耗管理手法の提案

4.1 レール削正作業への活用例

試作したレール凹凸連続測定装置を用いて、筆者らはこれまで営業線で多数のレール凹凸測定を行っている。本章では、それらの事例のうち、レール削正による波状摩耗除去の際の削正パス数を検討した事例について述べる。

まず、レール波状摩耗モニタリング装置³⁾を用いて線区の波状摩耗発生箇所を把握した。この装置は、営業車の車上から車内騒音を測定することにより、レール波状摩耗の発生位置およびおおよその程度を把握するものである。図10に、バラスト軌道における車上モニタリングの結果の一例を示す。本装置では、波状摩耗を車内騒音の空間重み付きレベル化処理²⁾によって評価している。同図より、半径350mの曲線の円曲線部において、半径300mの曲線と比較して波状摩耗が顕著なことが推定された。なお、当該曲線は、施工延長が長いために2回に分けて6頭式レール削正車での波状摩耗除去が予定されていたが、円曲線内におけるレベルの変動が大きいことから、事前にレール凹凸連続測定装置を用いて詳細なレール凹凸を把握し、最適な削正パス数を検討することとした。

図11に、当該曲線のレール削正前後のレール凹凸測定結果を示す。同図より、削正前のレール凹凸より、区間AおよびBでは、波状摩耗の波高は0.2～0.3mm程度であることがわかる。一方で、区間Cでは波高は0.2mm以下と小さいことがわかる。ここで、6頭式レール削正

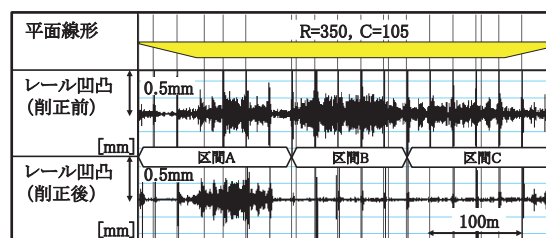


図11 試験区間のレール凹凸（レール削正前後）

は1パスで0.02～0.03mm程度の削正量が得られることから、区間Bには8パス、区間Cには6パスのレール削正を計画した。なお、区間Aは、レール削正を実施しなかった。

レール削正後のレール凹凸測定結果より、レール削正を実施した区間は、それぞれ異なるパス数で施工したにも関わらず、何れも波状摩耗がほぼ完全に除去されていることがわかる。

このように、本装置は、施工前にレール凹凸を測定することにより、前述したレール削正車の1パスの削正量との関係から、最適な削正パス数を検討することができる。さらに、施工後の測定では、仕上がり状態を確認することも可能である。

4.2 レール波状摩耗の管理手法の提案

最後に、今回試作したレール凹凸連続測定装置および既に我々が開発している各種技術を用いたレール波状摩耗の効率的な管理手法を提案する。図12に、管理フローを示す。

まず、レール凹凸を管理する線区において、レール波状摩耗モニタリング装置を用いた車上測定を実施する。この結果より、対象線区における波状摩耗発生区間を特

特集：軌道技術

定し、おおよその波状摩耗の振幅を推定する。

次に、波状摩耗の振幅が大きいと推定された区間において、開発したレール凹凸連続測定装置を用いた地上測定を実施する。この結果より、波状摩耗発生区間において、詳細なレール長手方向の発生位置および振幅を把握することが可能となる。

その後、レール削正車運用支援システム¹¹⁾を用いて、レール削正の必要性および削正車の運用を検討し、レール削正計画を策定する。その際、レール凹凸の測定結果を用いて、最適なレール削正のパス数を計画する。ここで、レール削正が計画された区間については、削正後にレール凹凸連続測定装置を用いることにより、仕上がり状態の確認を行うことができる。一方、運用上の制約でレール削正が計画されなかった場合や、レール凹凸が著しくレール削正よりもレール交換の方が効率的であると判断される場合等、必要に応じてレール交換を検討する。

最後に、上記の手順を継続的に繰り返し、線区のレール凹凸進みを定期的に把握する。なお、線区の年間の通過トン数にもよるが、レール削正車の運用やレール交換等の軌道工事が年度単位で計画されることを考慮すると、波状摩耗モニタリング装置による車上測定は軌道検測車の運行頻度と同程度でよく、レール凹凸連続測定装置による地上測定は年1回程度の頻度で実施することを基本とし、必要に応じて仕上がり確認のために測定することが望ましいと考えられる。

5. おわりに

本研究では、レール波状摩耗の凹凸を効率的に測定する装置として、可搬型のレール凹凸連続測定装置を開発した。加えて、装置の実用化のために、装置の制御および測定データを分析するためのソフトウェアを開発した。最後に、営業線の活用例およびレール波状摩耗の効率的な管理手法について示した。以下に、検討結果を列挙する。

- (1) 開発したレール凹凸連続測定装置は、センサを偏心矢配置することにより、検出特性が0となる周波数帯域を無くし、一般的な波状摩耗の波長帯域で高い検出倍率を達成した。その結果、再現性確認試験では、内軌波状摩耗、外軌波状摩耗共に、高い精度で検出できることがわかった。
- (2) 開発したソフトウェアは、現場で必要な機能を有しており、一般ユーザー向けの装置の実用化に寄与するものと考えられる。
- (3) レール凹凸連続測定装置とレール波状摩耗モニタリングを併用することにより、レール削正を効率的に施工することができ、レール波状摩耗の効率的な管理が行える可能性を示した。

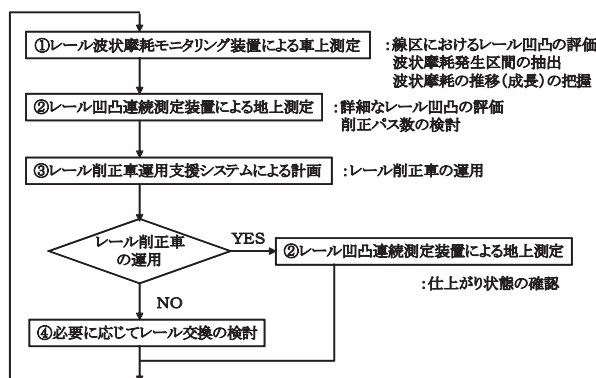


図 12 効率的なレール波状摩耗の管理フロー

文 献

- 1) 須永陽一, 井出寅三郎, 金尾稔: 軸箱加速度を活用した短波長軌道狂いの管理手法, 鉄道総研報告, Vol.9, No.2, pp.35-40, 1995
- 2) 田中博文, 猿木雄三, 清水惇, 芳賀昭弘, 福山幹康: 車上測定による波状摩耗モニタリング手法, 鉄道総研報告, Vol.24, No.12, pp.35-40, 2010
- 3) 猿木雄三, 田中博文, 清水惇, 福山幹康: 可搬型レール波状摩耗モニタリング装置の開発, 土木学会年次学術講演会概要集, IV-111, 2011
- 4) <http://www.mermecgroup.com/inspection-technology/track-measurement/61/1/rail-corrugation.php> (参照日: 2015年7月7日)
- 5) <http://www.railmeasurement.com/rail-corrugation-and-roughness-measurement/cat/> (参照日: 2015年7月7日)
- 6) 佐藤吉彦, 藤森聡二, 竹下邦夫, 服部登: レール頭頂面凹凸連続測定装置の開発, 鉄道線路, Vol.33, No.2, pp.22-24, 1985
- 7) 田中博文, 清水惇: 波状摩耗測定用の可搬型レール凹凸連続測定装置の開発, 土木学会年次学術講演会概要集, IV-110, 2011
- 8) 田中博文, 清水惇: 効率的な波状摩耗管理のための可搬型レール凹凸連続測定装置の開発と活用法, 鉄道工学シンポジウム論文集, 第17巻, pp.19-26, 2013
- 9) 吉村彰芳, 吉田康夫, 細川岳洋, 菊池勝浩: 軌道保守管理データベースシステム: マイクロ LABOCS-II+ の開発, 鉄道総研報告, Vol.6, No.11, pp.69-78, 1992
- 10) EN13231-3: Track Acceptance of works - Part 3: Acceptance of rail grinding, milling and planning work in track, 2012.
- 11) 田中博文, 福山幹康, 三和雅史: レール凹凸評価指標と削正車最適運用計画策定システム, 鉄道総研報告, Vol.23, No.10, pp.5-10, 2009