

## 振動モニタリングによるレール波状摩耗の進展把握システムの開発

鉄道総合技術研究所 正会員 ○田中博文 梶原和博  
ソナス株式会社 非会員 神野響一 川西 直  
東京大学 正会員 蘇 迪 長山智則

## 1. はじめに

レール波状摩耗は、騒音や振動、さらには軌道部材の劣化や軌道変位進み等を助長することから、鉄道事業者はその状態を適切に保守する必要がある。一般に、レール波状摩耗の保守としてはレール削正が行われているが、再発生を繰り返すため、鉄道事業者はその保守に苦慮している。また、レール削正は、レール損傷予防を目的とした疲労層除去のためにも必要であるため、レール削正能力が慢性的に不足している鉄道事業者が多い。

そこで、著者らは、波状摩耗発生区間のレール凹凸を継続的に測定することで、波状摩耗の進展過程をモデル化し<sup>1)</sup>、このモデルを用いたレール削正効率の検討を行っている<sup>2)</sup>。一方で、レール凹凸の継続測定には、人手がかかるため多大な労力を要していた。

そこで本稿では、無線式の加速度センサを波状摩耗発生区間の軌道に設置し、レール振動加速度を継続的にモニタリングすることで、波状摩耗の進展度合いを把握するシステムを構築し、営業線に試験導入した結果について報告する。

## 2. レール波状摩耗の進展過程と飽和期の特徴

図-1 に、波状摩耗の進展過程モデル<sup>1)</sup>を示す。進展過程には、形成期、成長期、飽和期の3段階がある。形成期は、微小凹凸が形成される段階、成長期はその中から特定波長の凹凸が成長し波状摩耗として顕在化する段階である。さらに、飽和期は、凹凸の成長に伴って車輪がレールに追従できなくなり車輪がレールから離れることで、レール凹凸の成長が抑制される段階である。

ここで、飽和期に達したレール凹凸の形状は、正弦波状であったものが三角波状に変化し、これに伴って基本周波数の高調波成分が出現することがわかっている<sup>3)</sup>。さらに、別途実施したシミュレーション<sup>3)</sup>により、飽和期に達すると車輪がレールを衝撃的に加振することにより、軌道や車両の応答にも高調波が出現することが予測されている。

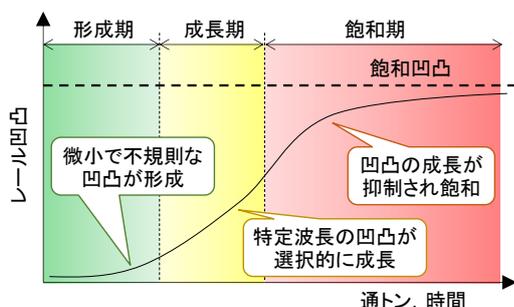


図-1 レール波状摩耗の進展過程モデル

## 3. 構築した進展把握システムの概要

前述したような特徴を有する波状摩耗の進展過程の飽和期における軌道の動特性を、間接的に観測することによって、レール凹凸を測定せずとも、波状摩耗の進展度合いを把握できる可能性がある。そこで、本稿では、レール振動加速度によるモニタリングシステム（以下、進展把握システムという）について検討した。

図-2 に、進展把握システムの構成を示す。現地側システムは、軌道内には最小限の機器として子機（加速度センサ、電池駆動）のみを設置し、軌道外に親機（AC100V 駆動）を設置する。親機と子機間は専用の無線ネットワークで通信する。測定データは、親機から、携帯電話回線等により、専用のクラウドサーバーに送信される。そのサーバーに、事務所側システムからアクセスすることで、現地に赴かずとも、常時、軌道振動加速度の測定データの確認が可能となる。

なお、波状摩耗の進展速度は、軌道条件や車両の運転条件によって大きく異なり、区間によっては削正から数ヶ月程度で再発生することから、高頻度かつ継続的に測定可能なシステムとした。

このようなシステムを構築するには、橋梁等の構造物の地震時挙動のモニタリングや、老朽構造物の健全度診断のために、実用化されている類似のシステムを活用することが可能である<sup>4)</sup>。図-3 に、提案するシステムに活用可能と考えられる加速度センサの例を示す。当該センサは、無線通信に対応しており、かつ電池で長期間駆動する。測定データおよびセンサ状態は、クラウド上で閲覧可能である。なお、測定システムは、列車通過時の振動をトリガーとして前後一定時間のデータを収集し、内蔵のSDカードに記録するとともに、列車密度の低い時間帯にクラウドサーバーにデータを転送する等して、電池の消費を抑えるようにした。

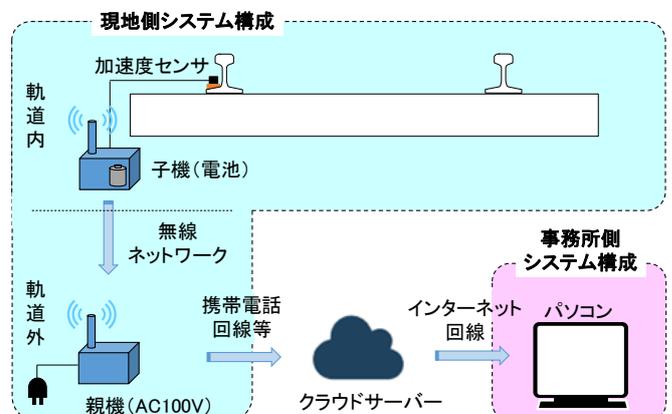


図-2 レール振動加速度による進展把握システムの構成

キーワード：波状摩耗，進展過程，飽和期，高調波，振動加速度，無線ネットワーク

連絡先：〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道管理 TEL042-573-7277



図-3 無線式加速度センサの例

装置型番		sonas x02
仕様		長期計測用
使用加速度センサ	メーカー	Analog Devices
	型番	ADXL357
センサ性能	計測値	3軸加速度
	ノイズレベル	80 $\mu$ g/ $\sqrt$ Hz
	消費電流	200 $\mu$ A
	計測範囲	$\pm$ 40G
センサ取り付け方法		外付け
センサ部寸法		40×30×15mm
センサケーブル長		40cm
保護等級		IP65相当
ユニット性能	内蔵可能ストレージ	フラッシュメモリ32GB
	内蔵バッテリー	単1電池×5
	バッテリー持続目安時間	連続計測時:1.5年 トリガ待機時:6年
	ユニット部寸法	75×120×100mm
計測周波数		最大2000Hz



図-4 軌道内への加速度センサの設置状況

#### 4. 営業線への試験敷設事例

構築した進展把握システムの営業線への試験敷設事例について示す。

##### (1) 試験敷設箇所の概要

試験線区は、年間通過トン数が約1800万トンの通勤路線である。試験敷設箇所は、地下に位置する半径185mの急曲線で、軌道構造は直結系軌道（防振まくらぎ直結軌道）である。この曲線では、内軌に発生した波状摩耗の凹凸除去のために、毎年レール削正車による削正が実施されているが、削正から概ね2～3ヶ月で削正前の状態まで波状摩耗が再発生し、保守に苦慮している箇所である<sup>1)</sup>。

図-4に、軌道内への加速度センサの設置状況を示す。同図に示すように、センサ（子機）は、レール締結装置間のFC側のレール底部に設置し、電源・通信モジュールは、隣接するまくらぎ上面端部に設置した。親機は、AC100V電源を確保するため、100m程度離れた近隣の駅のホーム下に設置した。

##### (2) レール振動加速度の分析結果

この区間において、加速度センサを設置後に、通常通りレール削正による波状摩耗の凹凸除去を実施し、その前後での加速度データの推移を分析した。

図-5に、測定したレール上下振動加速度のPSDの推移を示す。同図より、レール削正前には、220Hz付近に明瞭なピークが見られる。これは、当該区間に発生する波状摩耗の基本周波数に対応するピークである。また、440Hz付近にもピークが見られ、2次の高調波と考えられる。レール削正の直後（削正3日後）には、これらのピークを含めて、全体的にパワーが低下しているが、削正37日後には、220Hzおよび440Hz付近に明瞭なピークが出現している。さらに削正106日後には、削正前と概ね同じ周波数特性となっている。このことから、この箇所では、削正から約1ヶ月程度で既に飽和期に入り、その後約3ヶ月程度で削正前の状態まで進展過程が推移している可能性がある。

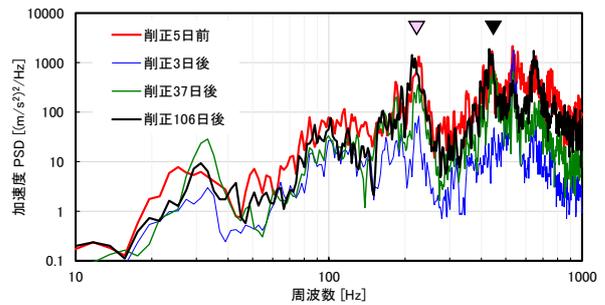


図-5 レール振動加速度のPSDの推移

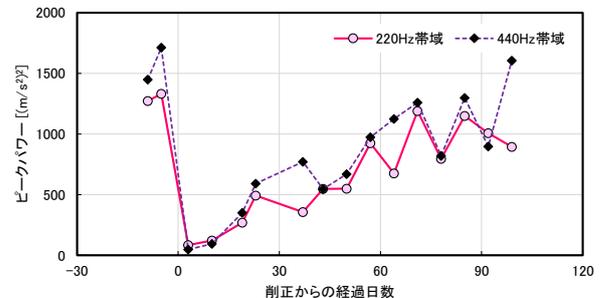


図-6 レール振動加速度のピークパワーの推移

図-6に、図-5のPSDで確認された220Hzおよび440Hz帯域のピークパワーの推移を示す。ピークパワーは、前述の帯域の前後40Hzの最大値とした。同図より、データには若干のばらつきが見られるものの、レール削正によって減少したパワーが再度増加傾向にあることがわかる。なお、データのばらつきは、この路線を2種類の車両形式が走行していることに加えて、列車速度や車輪踏面状態のばらつき等が影響していると考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では、無線式の加速度センサを用いたレール波状摩耗の進展把握システムを構築し、営業線に試験導入した。以下に、得られた知見を列挙する。

- (1) 構築した進展把握システムは、営業線での長期の継続測定に適用可能である。
- (2) 構築した進展把握システムを用いることで、レール凹凸を直接測定しなくとも、レール波状摩耗の進展度合いを把握できる見込みを得た。

今後は、レール波状摩耗の進展速度や軌道構造等が異なる複数の箇所に、開発した進展把握システムを敷設して測定データの分析を進め、進展度合いの把握精度を検証する予定である。

#### 参考文献

- 1) 田中博文, 三和雅史: レール波状摩耗の定期測定による凹凸進みモデルの検証, 日本機械学会2017年度年次大会, No.G1800204, 2017.
- 2) 田中博文, 梶原和博, 三和雅史: レール削正による波状摩耗の凹凸除去モデルの構築とレール削正効率の試算, 第74回土木学会全国大会, VI-524, 2019.
- 3) 網干光雄, 田中博文: レール波状摩耗の進展過程に関するシミュレーション解析, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.878, No.19-00051, 2019.
- 4) 鈴木誠, 長山智則, 大原壮太郎, 森川博之: 同時送信型フラッシングを利用した構造モニタリング, 電気情報通信学会論文誌B, Vol.J100-B, No.12, pp.952-960, 2017.