

レール上下振動加速度モニタリングに基づく レール波状摩耗の進展評価手法

田中 博文* 梶原 和博*

Evaluation Method of Growth Process of Rail Corrugation by Monitoring Rail Vertical Vibration

Hirofumi TANAKA Kazuhiro KAJIHARA

Rail corrugations cause noise, vibrations and deterioration of track components, which increase the frequency of track maintenance work. However, a measurement method that efficiently evaluates the growth of rail corrugation has not been established. The authors of this paper have developed a monitoring system for rail corrugations that enables long-term remote measurement of rail vibrations by means of battery-powered accelerometers and a wireless sensor network. In this study, the relationship between rail vertical vibration characteristics and actual rail corrugations measured on business line was investigated to verify the applicability of the developed system for identifying the growth process of rail corrugations.

キーワード：レール波状摩耗，進展過程，レール振動，モニタリングシステム，無線センサ，高調波成分

1. はじめに

レール波状摩耗（以下，波状摩耗）は，図1に示すように，鉄道車両の走行に伴いレールに形成される規則的な凹凸である。波状摩耗は多様な線形や軌道構造で発生し，波状摩耗が生じた区間を鉄道車両が走行すると，騒音・振動の発生や，軌道部材の劣化，軌道変位進みが助長される。そのため，鉄道事業者は波状摩耗の発生状況を把握し，その状態に応じて主にレール削正車を用いた凹凸除去（以下，レール削正）を行っているが，線路上に点在する波状摩耗の発生状況を正確に把握することは困難である。

波状摩耗の発生機構については，これまでに多様な観点から多くの調査・研究^{例えば1)~4)}が行われてきたが，十分には解明されておらず，波状摩耗の根本対策の提案には至っていない。一方，著者らは，営業線における波状摩耗の定期測定結果⁵⁾や軌道/車両の相互作用を考慮した動的シミュレーション⁶⁾の結果から，波状摩耗の凹凸振幅の増加傾向が成長曲線でモデル化できることを提案している。また，進展過程の最後の「飽和期」において，実務で問題となる騒音・振動が顕在化すると考えている。したがって，波状摩耗の進展程度を監視し，「飽和期」への到達を目安に保守計画を策定することで軌道の維持管理の効率化が期待できる。波状摩耗の効率的な測定方法として，一定区間のレール凹凸を地上で連続的かつ直接測定する可搬型の装置⁷⁾が実用化されている。この装置を用いてレール凹凸を定期的に測定することで，波状摩耗の進展傾向を把握することができる⁵⁾

が，高頻度の測定には多大な労力を要することが課題となる。

そこで，本研究では，比較的容易に測定可能なレール振動加速度を常時モニタリングし，振動特性の変化から波状摩耗の進展過程を評価する手法を検討した。このために，バッテリー駆動の無線式加速度センサを用いた計測システムを構築し，波状摩耗が発生している営業線の急曲線に設置して継続的にデータを取得した。そして，得られたレール振動加速度の振動特性とレール凹凸の関連性を分析し，提案手法の有効性を検証した。

2. レール波状摩耗の進展過程とその特徴

図2に，著者らが提案する波状摩耗の進展過程モデルを示す⁶⁾。波状摩耗の進展過程には「形成期」「成長期」「飽和期」の3段階があり，凹凸振幅の増加傾向は成長曲線によってモデル化することができる。ここで，「形成期」は微小で不規則な凹凸が形成される段階，「成長期」は特定波長の凹凸が選択的に成長する段階，「飽和期」



図1 レール波状摩耗の発生状況の例

* 軌道技術研究部 軌道管理研究室

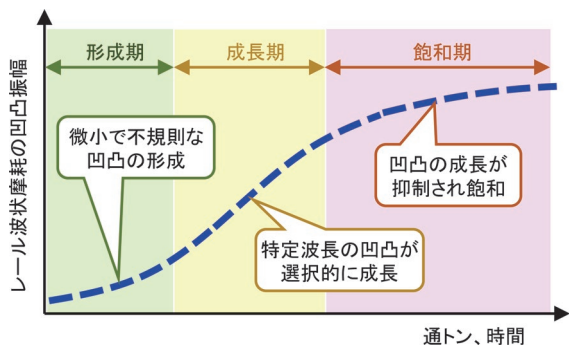


図2 レール波状摩耗の進展過程モデル

は凹凸の成長が抑制される段階である。このうち「飽和期」では、凹凸の成長に伴って車輪がレールに追従できなくなり、車輪とレールが接触、非接触状態を繰り返すことで凹凸波形が正弦波状から三角波状に変形する。これにより、凹凸波形の空間周波数成分に基本の空間周波数の整数倍の成分（高調波成分）が出現し⁶⁾、軌道や車両の応答にも高調波成分が出現することがシミュレーションにおいて確認されている⁸⁾。そして、飽和期では車輪とレールの衝撃により、実務で問題となる騒音・振動が顕在化すると考えられる。

3. 構築した計測システムの概要

2章で述べた波状摩耗の進展過程の特徴を容易かつ低コストに評価する方法として、無線式加速度センサを用いたレール振動の常時モニタリングが考えられる。実際に、レール振動は計測が容易であり波状摩耗の発生状況と一定の関連性が見られることから、これまでにレール振動計測による波状摩耗のモニタリング方法が提案されている⁹⁾。

波状摩耗の進展過程の評価に無線式加速度センサを適用するにあたっては、小型で軌道内への設置が容易であること、長期継続測定が可能な耐久性と省電力性を有すること、波状摩耗によって励起される振動の周波数に対して十分なサンプリング周波数であることが求められる。このような観点から、本研究では構造物の地震時挙動モニタリングや健全度モニタリングに実用化されている無線計測システム¹⁰⁾（ソナス社：無線振動計測システム x02）を採用した。

図3に、計測システムの概要を示す。計測システムは、センサユニット（加速度センサ／バッテリー駆動）とベースユニット（制御・通信装置／AC100V駆動）で構成される。表1にセンサユニットの諸元を示す。計測データは、センサユニットに内蔵された記録メディアに保存されるとともに、無線通信によりセンサユニットからベースユニットへ送信される。ベースユニットに収集されたデータは、携帯電話回線を通じて専用のクラウドサーバーへ伝送され、情報端末から閲覧・ダウンロード

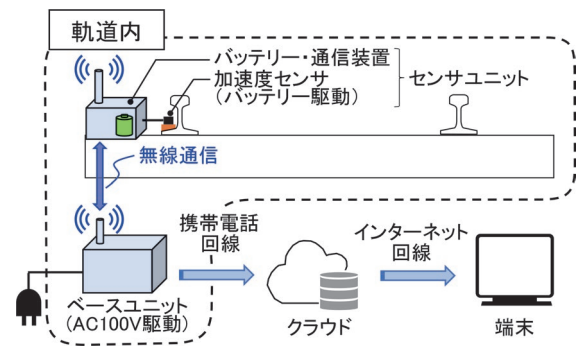


図3 計測システムの概要

表1 センサユニットの諸元

使用加速度センサ		Analog Devices ADXL357
加速度センサ部寸法		40×30×15mm
性能	計測軸	3軸 (X, Y, Z)
	測定範囲	±40G (±392m/s ²)
	フィルタ	ローパスフィルタ：1kHz ハイパスフィルタ：DC
	ノイズ密度	80 [μg/√Hz] (測定範囲±10Gの場合)
バッテリー・通信装置寸法		75×120×100mm
バッテリー		単1電池×5本
性能	保護等級	IP65相当
	継続測定可能目安	連続計測時：1.5年程度 トリガー待機時：6年程度
サンプリング周波数		最大2kHz

が可能である。なお、計測システムは計測時間帯の指定や、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することが可能である。これによって、センサユニットのバッテリー消費の抑制を図っている。

4. 営業線における測定概要

4.1 測定箇所の概要

本研究では、実際に波状摩耗が生じた営業線の急曲線において、レール凹凸測定および本計測システムを用いたレール振動の長期計測を実施した。計測システムを用いたレールの振動計測は、列車速度や車両形式、乗車率などの運転条件を極力揃えるために、列車運行密度の低い昼間の時間帯に行った。なお、レールの振動計測は毎日実施しているが、本研究ではレール削正の翌日から最長で約8カ月間継続的に計測したデータのうち、測定ノイズ等の影響が大きいものを除外し、1日あたり1～2列車程度のデータを分析対象に選定した。

図4に、測定箇所の概要を示す。同図に示すように、

測定箇所は通勤路線の急曲線（半径 $R=185\text{m}$ ，カント $C=105\text{mm}$ ）である。軌道構造は，コイルばね防振軌道と防振まくらぎ直結軌道の2種類で構成される。走行する車両は2形式の通勤形車両のみで，年間通過トン数は約1900万トン，測定箇所の列車速度は40～45km/h程度である。計測システムによるレール振動の計測箇所は，図中に示した測点A（コイルばね防振軌道区間）と測点B（防振まくらぎ直結軌道区間）における内軌とした。なお，測点Bの近傍では横圧の低減を目的とした摩擦緩和材¹¹⁾が内軌に散布されている。

図5に，センサユニットの設置状況を示す。同図に示すように，センサユニットの加速度センサはレール締結間中央の軌間外方のレール底部にエポキシ系接着剤で固定した。バッテリー・通信装置は，加速度センサ近傍のまくらぎ端部上面にエポキシ系接着剤で固定した。なお，図示していないが，ベースユニットは，近傍の駅のホーム下に設置した。

4.2 レール凹凸の発生状況

レール振動の計測点近傍における波状摩耗の発生状況を調査するため，レール削正からの通過トン数が異なる2時期（レール削正後約505万トン，1403万トン）において，レール凹凸測定を行った。レール凹凸の測定には，図6に示す鉄道総研で開発したレール凹凸連続測定装置⁷⁾を用いた。

図7に，当該曲線における内軌のレール凹凸の発生状況を示す。同図にはレール凹凸波形とレール凹凸波形のスペクトログラムに加え，軌道構造を併記している。レール凹凸波形は，復元波形に波長50～200mmのバンドパスフィルタ処理を行ったものである。同図より，波状摩耗の発生状況は軌道構造によって異なることが分かる。

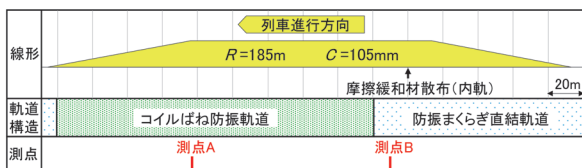


図4 測定箇所の概要



図5 センサユニットの設置状況

コイルばね防振軌道区間の測点A近傍では，レール凹凸振幅（全振幅）はレール削正後約505万トン通過時点で0.05mm程度以下であったのに対し，レール削正後約1403万トン通過時点では0.2mm程度まで増加していた。一方，防振まくらぎ直結軌道区間の測点B近傍では，凹凸振幅の顕著な増加は見られなかった。これは，軌道構造の違いに加えて，前述した摩擦緩和材の散布効果も影響しているものと考えられる。

同図のスペクトログラムは，レール凹凸の復元波形を短時間フーリエ変換して得たものである。ここに示すスペクトログラムは，凹凸振幅のパワースペクトル密度の大きさを色で表現し，凹凸の大きさ，空間周波数，キロ程の情報を一元的に示したものである。同図より，測点Aを含むコイルばね防振軌道区間においては，レール削正後約505万トン通過時点では，スペクトログラムに卓越する空間周波数成分は認められない。一方，レール凹凸振幅が0.2mm程度に至るレール削正後約1403万トン通過時点では，卓越する空間周波数成分（図中①）が認められ，空間周波数10 [1/m]（波長100mm）程度

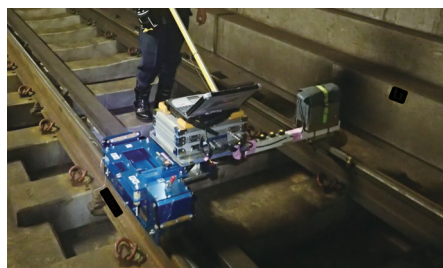


図6 レール凹凸連続測定装置による測定状況

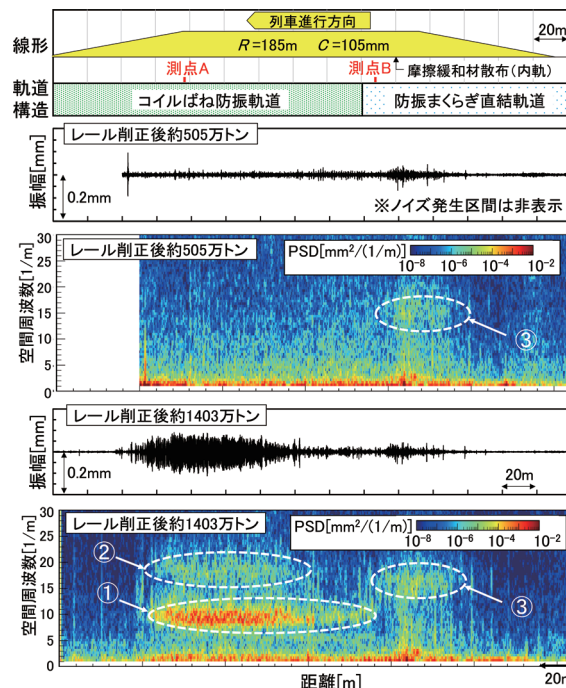


図7 レール凹凸の発生状況（内軌）

の波状摩耗が発生していることが分かる。また、同区間の 20 [1/m] 付近に卓越する空間周波数成分 (図中②) は、前述した波状摩耗の基本の空間周波数の約 2 倍であり、波状摩耗の飽和期に出現する高調波⁶⁾と考えられる。一方、測点 B を含む防振まくらぎ直結軌道区間では、レール削正からの通過トン数の増加に伴い、空間周波数 18 [1/m] (波長 55mm) 程度の成分がやや増加したように見受けられる (図中③)。このように、両測点近傍でレール波状摩耗の基本の空間周波数が異なるのは、軌道構造の違いに起因して波状摩耗の成長要因¹²⁾が異なるためである。

ここで、測定箇所が存在するレール凹凸によって励起される振動の周波数は、次式によって計算される。

$$f = \frac{v}{3.6 \times \lambda} \quad (1)$$

ここに、 f は周波数 [Hz]、 v は列車速度 [km/h]、 λ はレール凹凸の波長 [m] である。よって、当該区間の列車速度を 40~45km/h と仮定すると、上記の凹凸によって測点 A では 110~125Hz (10 [1/m] に対応)、測点 B では 200~225Hz (18 [1/m] に対応) 程度のレール振動が励起されると推測される。

5. レール上下振動加速度の推移

5.1 加速度の発生状況

計測システムでは、表 1 に示した通りレールの上下、左右、前後振動加速度を測定しているが、本論文では特徴的な傾向が見られたレールの上下振動加速度のみに着目し考察を行う。左右振動加速度、前後振動加速度を含めた総合的な分析については文献 13 を参照されたい。

図 8 に、レール上下振動加速度の波形例として、測点 A の波形を示す。同波形は、計測システムで収録した加速度波形に対し、900Hz のローパスフィルタ処理を行ったものである。また、以降の分析では列車通過時を含む 30 秒間の波形を対象とする。同図において、加速度振幅が大きくなる時刻は車両の台車通過時に対応する。全振幅の最大値はレール削正後約 11 万トン通過時点で 50m/s^2 程度以下であったのに対し、レール削正後約 1398 万トン通過時には 400m/s^2 程度まで増加していた。

5.2 振幅の推移

レール上下振動加速度の振幅は、レール凹凸の振幅に応じて増加すると考えられる。そこで、加速度波形の平均的な振幅を表す指標である RMS (Root Mean Square, 二乗平均平方根) を算出し、その推移を分析した。図 9 にレール上下振動加速度の RMS の推移の例を示す。同図より、測点 A では RMS はレール削正後約 500 万トン程度まで

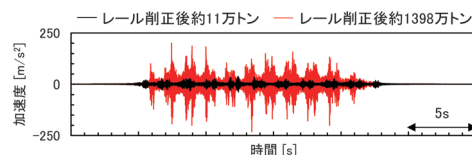


図 8 レール上下振動加速度の波形例 (測点 A)

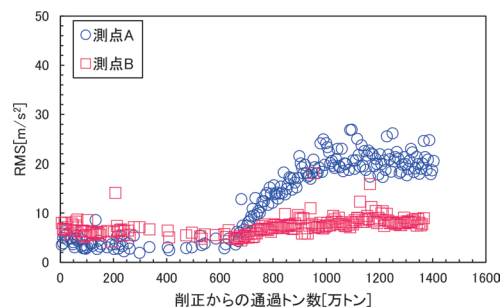


図 9 レール上下振動加速度の RMS の推移の例

は小さな水準で推移し、その後急増する。この時期に車輪がレールの凹凸に追従できなくなり、波状摩耗の「成長期」から「飽和期」に移行したと推察される。レール削正後約 1000 万トン通過以降は、RMS は概ね一定値で推移している。ここで、図 7 に示したように同時期 (レール削正後約 1403 万トン通過時点) に測定したレール凹凸波形には高調波成分が見られるため、この時期に凹凸の成長が抑制され飽和する段階に到達したと考えられる。一方、測点 B では RMS が通過トン数の増加に伴ってやや増加するが、測点 A と比べて RMS は小さく、明瞭な増加傾向は見られない。本傾向は、図 7 に示したように、防振まくらぎ直結軌道区間でレール凹凸振幅に明瞭な増加が見られなかったことと整合する。なお、これらの図に見られるプロットのばらつきは、列車速度や車輪踏面の凹凸状態、車両形式の違い等が影響していると考えられる。

5.3 周波数特性の推移

図 10 に、レール削正からの通過トン数の異なる時期に測定したレール上下振動加速度の PSD (パワースペクトル密度) の例を示す。図 10 (a) より、測点 A では、レール削正からの通過トン数の増加に伴い 115Hz、230Hz、345Hz 程度のパワーの増加が顕著である。当該区間のレール凹凸の波長 (100mm 程度) と列車速度 (40~45km/h 程度) を考慮すると、これらは列車通過時にレール凹凸により励起される振動の基本周波数 (115Hz 程度) と、その高調波 (230Hz、345Hz 程度) と整合する。なお、レール削正後約 11 万トンの PSD に見られる 65Hz 付近のピークは軌道スラブ直下のコイルばねと内軌の微小な凹凸に起因した振動成分¹⁴⁾の可能性があり、450Hz 付近のピークはレール削正に伴う周期的な痕跡 (以下、レール削正痕) に起因した振動成分と考えられる。

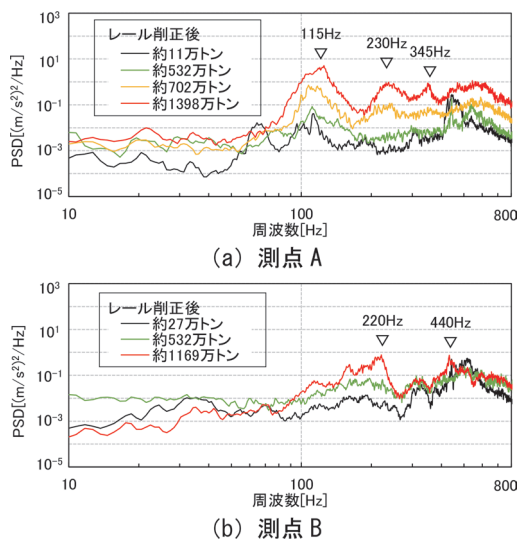


図 10 レール上下振動加速度の PSD の例

図 10 (b) より、測点 B では、レール削正からの通過トン数の増加に伴い 220Hz 帯域のパワーが増加する傾向にあるが、その高調波成分 (440Hz) の出現は測点 A と比べて明確に見られない。なお、300~320Hz 付近の緩やかなピークは、その大きさは通過トン数によらず概ね同程度であるため、軌道の上下振動系の固有振動に由来する可能性がある。また、500Hz 付近の緩やかなピークは測点 A と同様にレール削正痕に起因すると考えられる。

波状摩耗の進展に伴うレール振動の基本周波数およびその高調波成分の増加傾向を評価するため、周波数帯域別に PSD の推移を分析した。ここでは、基本周波数とその高調波に対応する周波数帯域として、測点 A では 115Hz、230Hz 帯域、測点 B では 220Hz、440Hz 帯域に着目し、これらの帯域における PSD の平均値を算出した。

図 11 に、測点 A、B におけるレール上下振動加速度の周波数帯域別 PSD の推移例をそれぞれ示す。図 11 (a) より、測点 A ではレール削正後約 700 万トン以降に各周波数帯域でパワーが増加する傾向にあり、かつ基本周波数帯域 (115Hz 帯域) のパワーが 2 次高調波帯域 (230Hz 帯域) に先行して増加する。ここで、数値解析による「飽和期」の特徴⁶⁾に基づくと、レール上下振動における基本周波数帯域のパワーの増加は「成長期」における凹凸振幅の増加、2 次高調波帯域のパワーの増加は「飽和期」に移行する際のレールと車輪の衝撃に起因すると考えられる。

図 11 (b) より、測点 B では通過トン数の増加に伴って基本周波数帯域 (220Hz 帯域) のパワーが僅かに増加する傾向が見られる。一方、図 11 (a) に示した、測点 A に見られたような基本周波数と高調波帯域の PSD の増加傾向は確認されない。この結果は、図 7 でレール凹凸波形に明瞭な振幅の増加や高調波の出現が見られなかったことと整合し、測点 B は波状摩耗の「飽和期」に達していないと推定される。

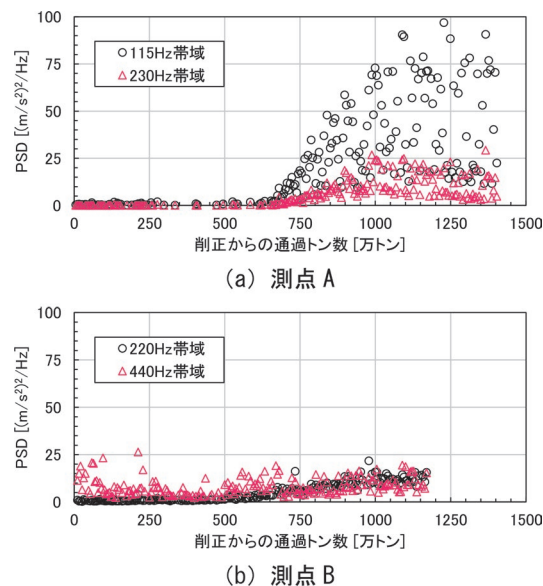


図 11 レール上下振動加速度の周波数帯域別 PSD の推移例

以上を踏まえると、波状摩耗の「飽和期」の特徴⁶⁾に基づく進展過程の評価には、レール上下振動のモニタリングが有効と考えられる。

6. レール上下振動加速度を活用した進展過程の評価

5 章までにおいて、波状摩耗の進展過程の評価にはレール上下振動の常時監視が有効と考えられた。そこで、測点 A の測定結果を用いて、レール上下振動加速度の RMS の推移と波状摩耗の進展過程との対応を考察する。

図 12 に、測点 A におけるレール上下振動加速度の RMS と 2 次高調波帯域の PSD の平均値の関係例を示す。同図より、波状摩耗の「飽和期」に到達した際にレール上下振動に高調波成分が出現すると考えると、RMS が小さく高調波成分が見られない期間 (レール削正後約 500 万トン以前) が「形成期」、RMS が微増し始めるが高調波成分は見られない期間 (レール削正後約 500 万~700 万トン) が「成長期」、RMS が急増しかつ高調波成分が出現する期間 (レール削正後約 700 万トン以降) が「飽和期」に該当すると推定される。ただし、形成期と成長期の境目については明確ではないので、今後も検証を続ける必要がある。

このように、本研究で適用した計測システムを用いてレール上下振動加速度を測定し、RMS および波状摩耗の波長に対応する周波数帯域別 PSD の推移をモニタリングすることで、波状摩耗の進展過程、特に成長期から飽和期への移行を評価できる見通しを得た。

開発した波状摩耗の進展評価手法は、現場毎の波状摩耗の進展傾向や対策効果の評価、レール削正までの残存

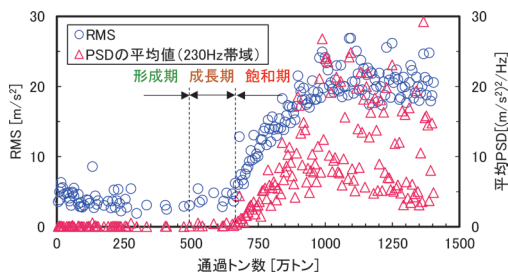


図 12 レール上下振動加速度の RMS と PSD の平均値の関係例 (測点 A)

期間・レール削正周期の予測、レール削正の仕上がり評価、凹凸振幅の推定によるレール削正計画支援等への活用が想定される。特に、騒音・振動が顕在化する「飽和期」の到達を評価できることは、実務上有益であると考えられる。今後は、上記の活用方法を実現するために必要なデータ分析手法を構築し、現地計測により実証する予定である。

7. まとめ

本研究では、バッテリー駆動の加速度センサと無線センサネットワークで構築した計測システムを用いてレール振動を常時モニタリングし、レール波状摩耗の進展過程を評価する手法を検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) レール波状摩耗が発生した営業線の急曲線で、計測システムによる長期計測を行った結果、レール上下振動加速度の RMS および波状摩耗の波長に対応する周波数帯域別 PSD はレール削正後の一定期間は小さな状態を維持していたが、その後急速に増加し、飽和に至る傾向が見られた。
- (2) レール上下振動加速度の RMS および波状摩耗の波長に対応する周波数帯域別 PSD が急増する期間では、波状摩耗の基本周波数、およびその高調波帯域の順にパワーが増加することを確認した。本傾向は、波状摩耗の成長期から飽和期への移行を観測したものと考えられた。
- (3) (1) (2) より、波状摩耗の進展過程の評価には、レール上下振動の常時モニタリングが有効と考えられた。また、計測システムを用いて、波状摩耗の進展過程や飽和期に至るまでの期間を評価できる見通しを得た。

今後は、定期的に測定したレール凹凸の測定データに基づき、波状摩耗の進展程度とレール上下振動加速度の関係性を詳細に検証する予定である。また、計測システムの実用化に向けて、軌道構造や車両・運転条件の違い等が波状摩耗の進展過程の評価に与える影響を把握するとともに、飽和期への到達を自動で判定する手法を構築する予定である。

文献

- 1) Grassie, S.L. and Kalousek, J., "Rail corrugation: Characteristics, causes and treatments," Proc.IMEchE, Part F, Vol.207, pp.57-68, 1993.
- 2) Matsumoto, A., Sato, Y., Ono, H., Tanimoto, M., Oka, Y. and Miyauchi, E., "Formation mechanism and countermeasures of rail corrugation on curved track," Wear, Vol.253, Issues 1-2, pp.178-184, 2002.
- 3) Manabe, K., "A hypothesis on a wavelength fixing mechanism of rail corrugation," Proc.IMEchE, Part F, Vol.214, pp.21-26, 2000.
- 4) 松浦章夫, 内田忠之, 福田拓也: 急曲線における内軌レールの波状摩耗発生メカニズムに関する研究, 土木学会論文集, No.773/I-69, pp.125-135, 2004
- 5) 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
- 6) 網干光雄, 田中博文: レール波状摩耗の飽和期における動特性と成長曲線, 日本機械学会論文集, Vol.87, No.898, 2021, DOI: 10.1299/transjsme.21-00017
- 7) 田中博文, 梶原和博, 清水惇, 網干光雄: 偏心矢法を用いたレール凹凸連続測定装置の開発とレール波状摩耗測定への適用, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.880, 2019, DOI: 10.1299/transjsme.19-00235
- 8) 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, 2019, DOI: 10.1299/transjsme.19-00051
- 9) 米原善秀, 谷本益久, 久保奈帆美, 古村吉史: 地下鉄急曲線における波状摩耗現象に着目した波状摩耗検知システムの開発, 第 26 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2019), JSCM-2-3, pp.146-149, 2019
- 10) 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, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J100-B, No.12, pp.952-960, 2017, DOI: 10.14923/transcomj.2017ASI0002
- 11) 伴巧, 深貝晋也, 陳樺, 名村明, 菊地圭介, 地子給和行: 曲線内軌用定置式摩擦緩和システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.26, No.12, pp.35-38, 2012
- 12) 田中博文, 梶原和博, 網干光雄: 営業線におけるレール波状摩耗の成長機構と進展過程の検証, 鉄道総研報告, Vol.34, No.4, pp.17-22, 2020
- 13) 梶原和博, 田中博文: 軌道振動モニタリングに基づくレール波状摩耗の進展把握手法, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.26, pp.33-40, 2022
- 14) 田中博文, 細田充: マルチボディダイナミクスを用いた外軌波状摩耗の発生に軌道支持剛性が与える影響の評価, 鉄道工学シンポジウム論文集, pp.29-36, No.20, 2016