

論文 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

梶原 和博¹・田中 博文²

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: kajihara.kazuhiro.70@rtri.or.jp (Corresponding Author)

²正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: tanaka.hirofumi.96@rtri.or.jp

レール波状摩耗は、鉄道車両の走行に伴ってレール頭頂面に形成される規則的な凹凸であり、騒音・振動や軌道状態を悪化させる要因となる。しかし、波状摩耗の進展傾向を効率的に把握する手法は確立されておらず、レールの保守や沿線環境対策上の課題となっている。そこで本研究では、無線式加速度センサを活用したレール波状摩耗の進展把握手法を提案する。本手法では、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軌道へ設置し、レール振動を常時監視してその振動特性の変化から波状摩耗の進展程度を推定する。計測システムを用いて営業線で測定を行った結果、レール上下振動加速度の振幅および周波数特性の推移から、波状摩耗の進展過程を把握できる見通しを得た。

Key Words: rail corrugation, growth process, rail vibration, monitoring system, wireless sensor network

1. はじめに

レール波状摩耗（以下、波状摩耗）は、鉄道車両の走行に伴いレール頭頂面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、凹凸の波長は数十から数百 mm 程度、振幅は 1mm 程度以下の場合が多い¹⁾。

波状摩耗が生じた区間を鉄道車両が走行すると、凹凸の波長と車両の走行速度に応じた騒音・振動が励起されることに加え、軌道を構成する各部材に大きな衝撃力が作用するため、軌道部材の劣化や軌道変位進みが促進される²⁾。そのため、鉄道事業者では波状摩耗の発生区間と程度を把握し、必要に応じて主にレール削正車を用いたレール削正（以下、削正）による凹凸除去が行われる²⁾。しかし、目視で波状摩耗の程度を評価することは困難であり、人力による測定は多大な労力を伴う。その結果、削正は事後保全的に行われ、レール削正車の運用効率の低下や沿線環境対策の効果が十分に得られない等の課題が生じている。

波状摩耗の発生機構については、これまでに材料力学や振動学、車両運動、軌道/車両の相互作用に至るまで、多様な観点から多くの調査・研究³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾が行われてきた。

しかし、これらの事例から得られた各要因が営業線の波状摩耗の発生形態にどのように寄与しているかは十分に解明されておらず、波状摩耗の根本対策の提案には至っていない。一方、営業線における波状摩耗の定期測定結果⁷⁾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⁸⁾の結果から、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、凹凸振幅の増加は成長曲線でモデル化できることが示されている。このうち「飽和期」では凹凸の成長に伴いレールと車輪が接触と非接触を繰り返す、実務で問題となる騒音・振動はこの段階で顕在化すると考えられる。したがって、波状摩耗の進展程度を監視し、「飽和期」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¹⁾が実用化されている。この装置を用いて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⁷⁾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。また、線区全体の評価に適した軸箱加速度を活用した方法⁹⁾は、運用コストの観点から全ての鉄道事業者に適用可能な手法とは言い難い。

そこで本研究では、比較的容易に測定が可能なレール

振動を遠隔かつ無人で常時監視し、レールの振動特性の変化から波状摩耗の進展程度を把握する手法を検討した。このために、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（以下、計測システム）を波状摩耗が生じた営業線に設置し、レール振動を最長約8カ月間測定した。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との関連性を分析し、レール振動に基づく波状摩耗の進展把握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-1 に波状摩耗の進展過程モデルを示す⁸⁾。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でモデル化できることが分かっている。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」は凹凸の成長が抑制され飽和に至る段階である。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⁸⁾、軌道や車両の応答にも高調波成分が出現することが予測されている¹⁰⁾。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。

よって以降では、波状摩耗の進展過程における上記の特徴に基づき、計測システムで得られたレール振動の常時計測結果から、波状摩耗の進展過程を把握可能であるかを検証した。

3. 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把握する方法として、無線式加速度センサを用いたレール振動の常時監視が考えられる。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

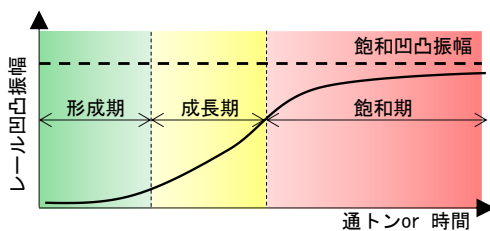


図-1 レール波状摩耗の進展過程モデル⁸⁾

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¹¹⁾。この方法は、波状摩耗の波長に対応するレール左右振動の周波数帯域のパワーの大きさを指標として、レールの潤滑を実施するものであるが、判定に用いる閾値の設定が課題とされている。一方、本研究で提案する手法は、凹凸の成長に伴って生じる上下方向の車輪/レールの接触力変動に起因したレールの振動特性に着目し、保守の目安となる波状摩耗の「飽和期」への到達を判断する点で既往の手法と異なる。

波状摩耗の進展把握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、本研究では橋梁の地震時挙動のモニタリングや、老朽構造物の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¹²⁾（ソナス社：無線振動計測システム x02）を採用した。

図-2 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

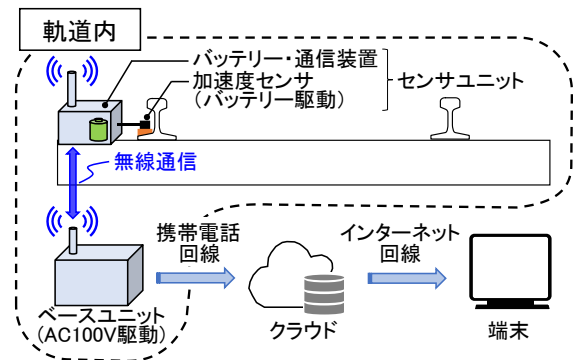


図-2 計測システムの概要

表-1 センサユニットの諸元

型番		Analog Devices ADXL357
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
	感度 (Min, Typ, Max)	(11776, 12800, 13824) [LSB/g]
ノイズ密度*		80 [μg/√Hz]
バッテリー・通信装置寸法		75×120×100mm
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 トリガ待機時: 6年
サンプリング周波数		最大 2kHz

*: 測定範囲±10Gの場合

される。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。

表-1にセンサユニットの諸元を示す。波状摩耗の基本周波数はその成長要因によって異なるが、国内で確認されている事例の多くは概ね300Hz程度以下である¹³⁾。よって、計測システムは飽和期の高調波成分の検出に対して十分なサンプリング周波数を有している。

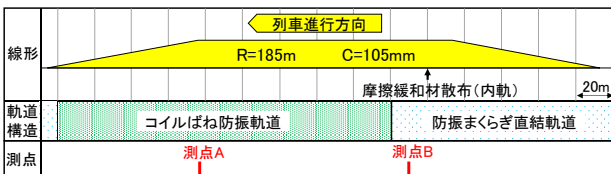
4. 営業線における測定概要

(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。

図-3に測定箇所の概要を示す。図-3(a)に示すように、測定箇所は年間通過トン数が約1900万トンの通勤路線の急曲線(半径185m, カント105mm)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、測定箇所の列車速度は40km/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-3(a)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が内軌に散布されている。図-3(b)にセンサユニットの設置状況の例を示す。同図に示すように、センサユニッ



(a) 測定箇所



(b) センサユニットの設置状況

図-3 測定箇所の概要

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、レールの上下(Z)、左右(X)、前後(Y)方向の加速度を測定した。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。

(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、削正からの通過トン数が異なる2時期(削正後約505万トン, 1403万トン)において、レール凹凸連続測定装置¹⁾を用いたレール凹凸測定を行った。

図-4に当該曲線における内軌のレール凹凸波形の例を示す。同図の波形は、レール凹凸の復元波形に波長50~200mmのバンドパスフィルタ処理を行ったもので、測定ノイズが含まれる区間のデータは非表示とした。同図より、波状摩耗の進展速度は軌道構造によって異なることが分かる。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、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。

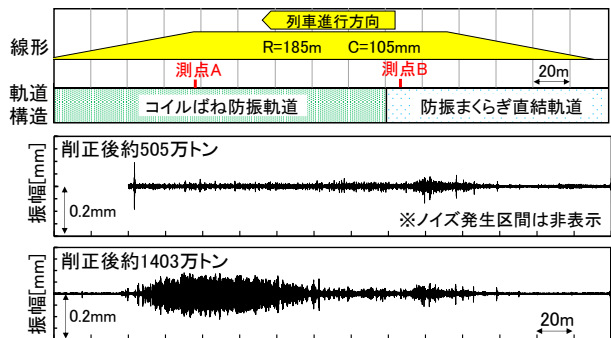


図-4 レール凹凸波形の例(内軌)

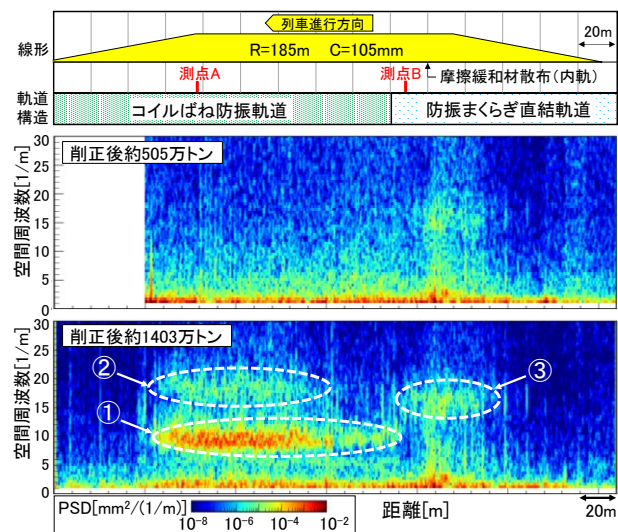


図-5 レール凹凸波形のスペクトログラムの例(内軌)

図-5に、レール凹凸の復元波形を短時間フーリエ変換して得たスペクトログラムの例を示す。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（以下、PSD）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。

図-5より、レール凹凸振幅が0.05mm程度以下である削正後約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程度に至る削正後約1403万トン通過時点では、コイルばね防振軌道区間の測点A近傍において卓越する空間周波数成分（図中①）が認められ、空間周波数8~12[1/m]（波長83~125mm）程度の波状摩耗が発生していることが分かる。また、同区間の16~24[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⁸⁾と考えられる。

一方、防振まくらぎ直結軌道区間の測点B近傍では、削正からの通過トン数の増加に伴い、空間周波数15~20[1/m]（波長50~67mm）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、両測点でレール凹凸の発生状況が異なるのは、軌道構造の違いに起因して波状摩耗の成長要因¹³⁾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。

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

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40km/hと仮定すると、上記の凹凸によって測点Aでは89~134Hz（8~12[1/m]に対応）と176~265Hz程度（16~24[1/m]に対応）、測点Bでは166~222Hz（15~20[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。

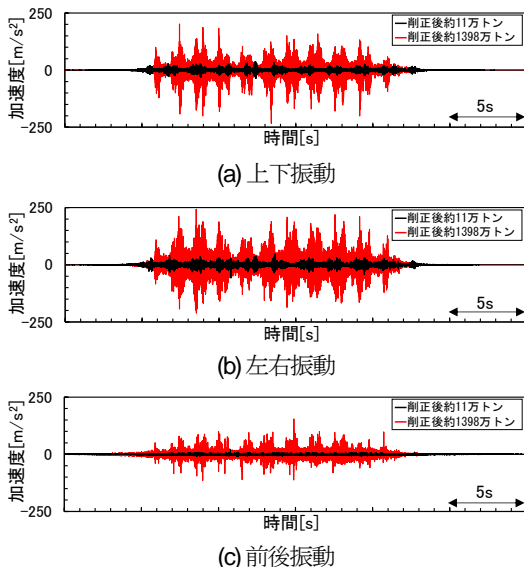


図-6 レール振動加速度波形の例

(3) レール振動加速度の発生状況

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、本研究では削正翌日から最長で約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-6にレール振動加速度波形の例を示す。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。また、加速度振幅はレールの左右、上下、前後振動の順に大きい。ここで、加速度振幅が最も大きい左右振動に着目すると、片振幅の最大値はレール削正後約11万トン通過時点で50m/s²程度以下であったのに対し、削正後約1398万トン通過時には250m/s²程度まで増加していた。

5. レール振動加速度振幅の推移

レール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、図-6に例を示した加速度波形に対して、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-7にレール振動加速度のRMSの推移の例を示す。

図-7(a)より、測点Aでは振動方向によらずRMSは削

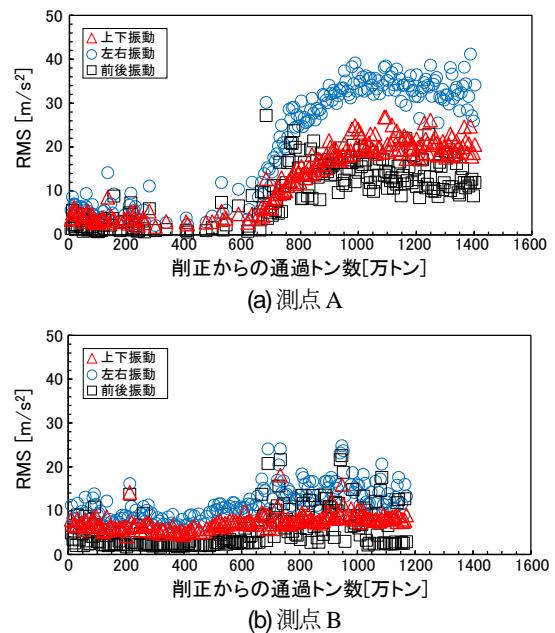


図-7 レール振動加速度のRMSの推移の例

正後約 500 万トン程度まで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。本傾向は左右、上下振動で明確であり、前後振動ではばらつきが大きい。削正後約 1000 万トン通過以降は、振動方向によらず RMS は概ね一定値で推移している。ここで、図-5 に示したように同時期（削正後約 1403 万トン通過時点）に測定したレール凹凸凸形状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。

図-7(b)より、測点 B では振動方向によらず RMS が通過トン数の増加に伴ってやや増加するが、図-7(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-4 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。

6. レール振動加速度の周波数特性の推移

(1) ピーク周波数の推移

図-8 に、削正からの通過トン数の異なる 4 時期に測定した測点 A におけるレール振動の PSD の例を示す。図-8(a)(b)より、測点 A のレール上下・左右振動では、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 (83~125mm 程度) と列車速度 (40km/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、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弾性材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 付近のピークは削正痕に起因した振動成分と考えられる。

図-9 に、削正からの通過トン数の異なる 3 時期に測定した測点 B におけるレール振動の PSD の例を示す。図-9(a)(b)より、測点 B のレール上下・左右振動では、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。また、上下振動に見られる 300~320Hz 付近の緩やかなピークは、左右・前後振動には見られず、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 と同様に削正痕に起因すると考えられる。

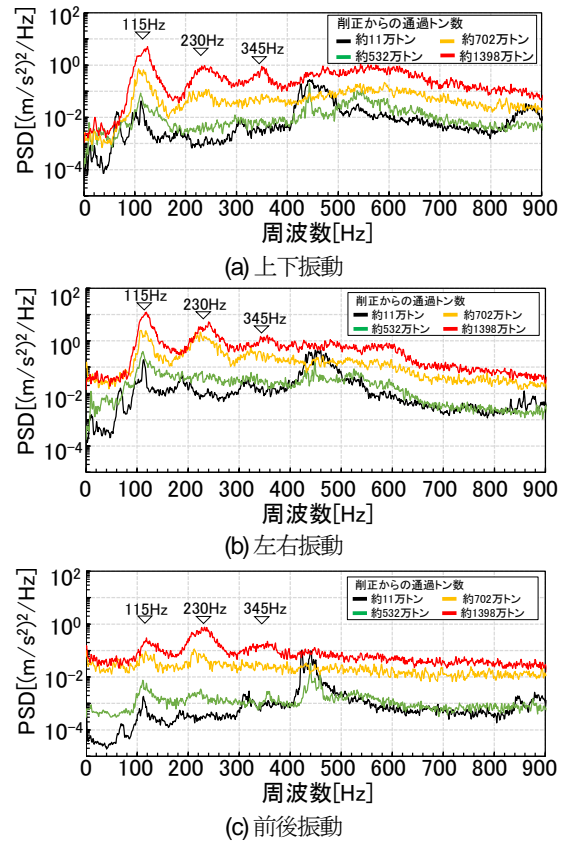


図-8 レール振動の PSD の例 (測点 A)

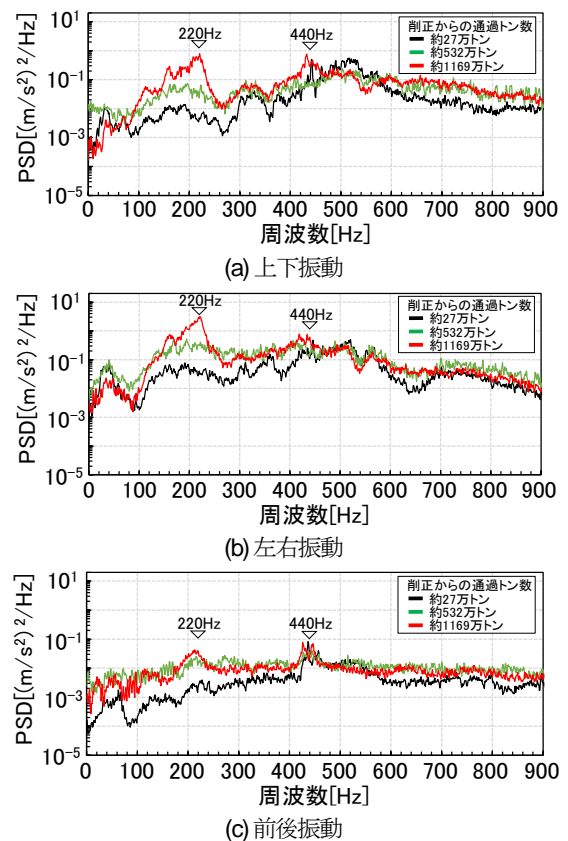


図-9 レール振動の PSD の例 (測点 B)

以上より、波状摩耗の進展に伴ってレール振動に凹凸の波長に対応する基本周波数とその高調波成分が増加することを確認した。

(2) 帯域別パワーの推移

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把握するため、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, 345Hz帯域、測点 Bでは220Hz, 440Hz, 660Hz帯域に着目し、これらの帯域におけるPSDの平均

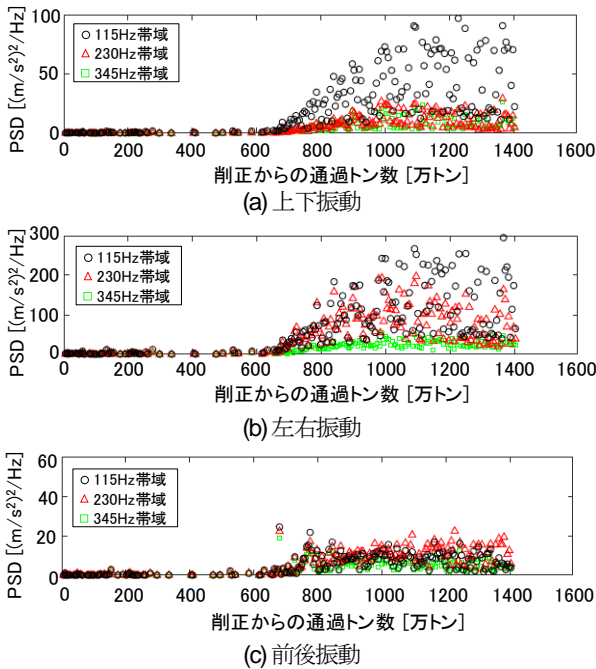


図-10 レール振動の周波数帯域別 PSD の推移例(測点 A)

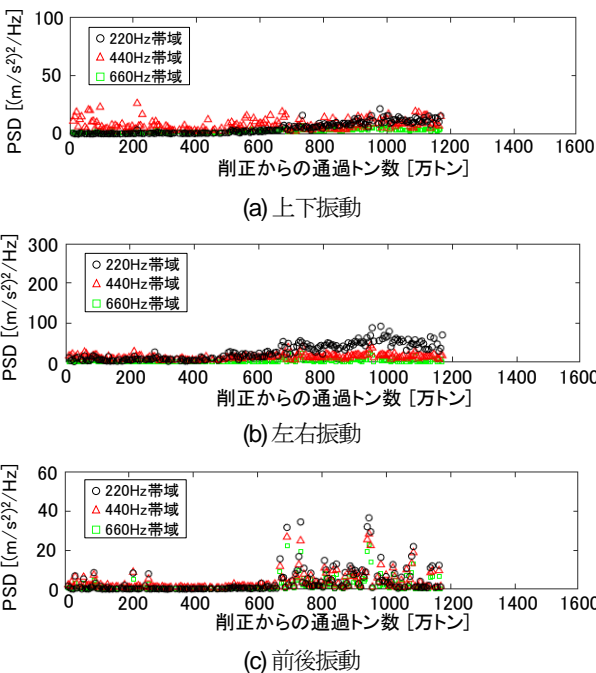


図-11 レール振動の周波数帯域別 PSD の推移例(測点 B)

値を算出した。図-10と図-11に測点 A, Bにおけるレール振動の周波数帯域別 PSD の推移例をそれぞれ示す。

図-10より、測点 Aでは振動方向によらず削正後約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るが、その後のパワーの増加程度は振動方向で異なる。具体的には、図-10(a)のレール上下振動では基本周波数帯域(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のに対し、図-10(b)のレール左右振動では基本周波数帯域と2次高調波帯域のパワーは概ね同じ大きさで増加する。なお、図-10(c)のレール前後振動については、PSDの増加傾向に周波数帯域による明確な差異は見られなかった。

ここで、数値解析による「飽和期」の特徴⁸⁾¹⁰⁾に基づく、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。

次に、図-10(b)のレール左右振動の傾向について考察する。急曲線内軌では車輪・レール間に作用する横クリープ力によりレールにメタルフローが生じることが実験・解析的に確認されており¹⁵⁾¹⁶⁾、このクリープ力の下でレールに微小な凹凸が存在すると、粘着とすべりを繰り返すスティックスリップが生じ、レール小返り振動が増幅されることが指摘されている⁶⁾¹⁶⁾。また、レール左右方向のスティックスリップによってレール頭頂面の左右振動加速度の振動数は大きく変化せず、その振幅が次第に大きくなることが解析的に示されている⁶⁾。ここで、図-12に測定 Aにおけるレール振動加速度波形の拡大図の例を示す。同図は、基本周波数とその高調波帯域のパワーが急増する時期(削正後約702万トン通過時)の波

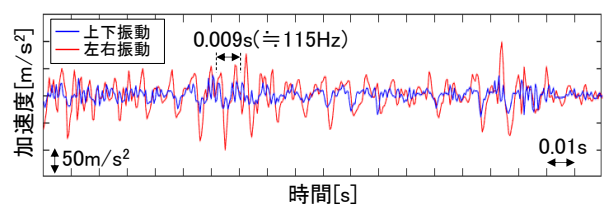


図-12 レール振動加速度波形の拡大図の例(測点 A)

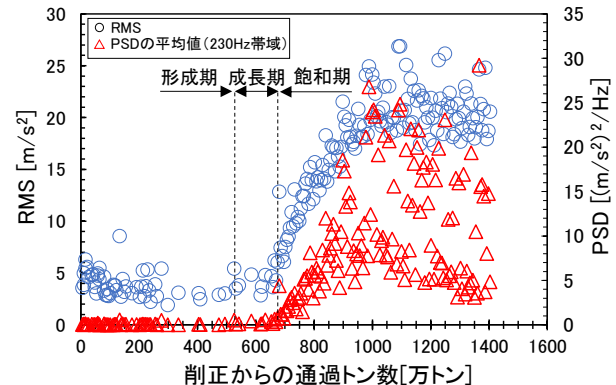


図-13 レール上下振動の RMS と PSD の平均値の関係例

形である。同図より、レール左右振動の加速度波形は上下振動と同じ周期（115Hz 程度）を基本周波数としながら、この周期で加速度振幅が最大となる前に減少し、再び増加するような挙動を示している。このことから、レール左右振動の高調波成分は、レール左右方向のスティックスリップ現象に起因する成分を含む可能性がある。

図-11 より、測点 B では振動方向によらず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)(b)の上下・左右振動には、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-4 や図-5 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。

以上を踏まえると、波状摩耗の「飽和期」の特徴⁸⁾¹⁰⁾に基づく波状摩耗の進展把握には、レールの上下振動の監視が有効と考えられる。

7. レール振動に基づく進展過程の推定

6 章までにおいて、波状摩耗の進展過程の把握にはレールの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-13 に、測点 A におけるレール上下振動の 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（削正後約 500 万トン以前）が「形成期」、RMS がばらつきも含めて相対的に大きく高調波成分が見られない期間（削正後約 500 万～700 万トン）が「成長期」、RMS が急増し高調波成分が出現する期間（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。なお、同図において「形成期」と「成長期」の明確な区分は困難であるが、「形成期」の現象を「成長期」「飽和期」から切り離すために便宜上区分したことに留意されたい。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の上下振動を測定し、別途レール凹凸測定⁹⁾で把握した凹凸の波長と列車速度から特定される周波数帯域の PSD の推移を監視することで、波状摩耗の進展過程を把握できる見通しを得た。

開発した波状摩耗の進展把握手法は、現場毎の波状摩耗の進展傾向把握や対策効果の評価、削正までの残存期間・削正周期の予測、削正の仕上がり評価、凹凸振幅の推定による削正計画支援等への活用が想定される。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。

8. 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監視し、レール波状摩耗の進展過程を把握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、レール振動加速度の RMS 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) レール振動加速度の RMS が急増する期間では、レールの上下振動において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把握には、レール上下振動の常時監視が妥当と考えられた。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把握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振動加速度の関係を詳細に検証する予定である。また、計測システムを実用化するためには、車両・運転条件等が波状摩耗の進展把握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必要がある。

REFERENCES

- 1) 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 [Tanaka, H., Kajihara, K., Shimizu, A. and Aboshi, M.: Development of rail surface roughness continuous measurement trolley using asymmetrical chord method and application for rail corrugation measurement, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 85, No. 880, 2019, DOI: 10.1299/transjsme.19-00235]
- 2) 梶原和博, 石川智行, 田中博文: レール波状摩耗の保守・管理に関する実態調査, 第 26 回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2019), JSCM-2-2, pp. 142-145, 2019. [Kajihara, K., Ishikawa, T. and Tanaka, H.: A survey on the maintenance and management of rail corrugation, *The Proceedings of J-RAIL2019*, JSME-2-2, pp. 142-145, 2019.]
- 3) Grassie, S. L. and Kalousek, J.: Rail corrugation: Characteristics, causes and treatments, *Proc.IMEchE*, Part F, Vol. 207, pp. 57-68, 1993.
- 4) 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.

- 5) Manabe, K.: A hypothesis on a wavelength fixing mechanism of rail corrugation, *Proc.IMEchE*, Part F, Vol. 214, pp. 21-26, 2000.
- 6) 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. [Matsuura, A., Uchida, T. and Fukuda, T.: Formation and growth mechanism of inner rail corrugation on steep-curved track, *Journal of the Japan Society of Civil Engineers*, No. 773/I-69, pp. 125-135, 2004.]
- 7) 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. [Tanaka, H. and Miwa, M.: Verification of rail roughness growth model for rail corrugation due to periodic measurement, *JSME annual meeting*, No. G1800204, 2017.]
- 8) 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 [Aboshi, M. and Tanaka, H.: Dynamic characteristics and growth curve of rail corrugation at saturation stage, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 87, No. 898, 2021, DOI: 10.1299/transjsme.21-00017]
- 9) 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, pp. 541-549, 2017. [Tanaka, H., Matsumoto, M., Harada, Y. and Oketani, E.: Study on application of axle-box acceleration measured on track inspection car for rail corrugation management on railway track, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 63A, pp. 541-549, 2017.]
- 10) 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 [Aboshi, M. and Tanaka, H.: Simulation analyses of progress process of rail corrugation, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 85, No. 878, 2019, DOI: 10.1299/transjsme.19-00051]
- 11) 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. [Yonehara, Y., Tanimoto, M., Kubo, N. and Komura, Y.: Development of the rail corrugation detecting system considering the observation of rail vibration and acting force in sharp curve, *The Proceedings of J-RAIL2019*, JSME-2-3, pp. 146-149, 2019.]
- 12) 鈴木誠, 長山智則, 大原壮太郎, 森川博之: 同時送信型フラッドイ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 [Suzuki, M., Nagayama, T., Ohara, S. and Morikawa, H.: Structural monitoring using concurrent transmission flooding, *IEICE Transactions on Communications*, Vol. J100-B, No. 12, pp. 952-960, 2017, DOI: 10.14923/transcomj.2017ASI0002]
- 13) 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. [Tanaka, H., Kajihara, K. and Aboshi, M.: Verification of growth mechanism and evolution process of rail corrugation by measuring rail surface roughness of commercial lines, *RTRI report*, Vol. 34, No. 4, pp. 17-22, 2020.]
- 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. [Tanaka, H. and Hosoda, M.: Influence evaluation of track supporting stiffness given to occurrence situation of high rail corrugation using multi-body dynamics, *Journal of Railway Engineering*, JSCE, No. 20, pp. 29-36, 2016.]
- 15) 西島悠太, 梶原和博, 田中博文: 金属組織分析及び車両走行シミュレーションによるレール波状摩耗の形成機構の推定, 鉄道工学シンポジウム論文集, No. 24, pp. 195-202, 2020. [Nishijima, Y., Kajihara, K. and Tanaka, H.: Estimation of generation mechanism of rail corrugation by metallographic analysis and running simulation, *Journal of Railway Engineering*, JSCE, No. 24, pp. 195-202, 2020.]
- 16) Ishida, M., Moto, T. and Takikawa, M.: The effect of lateral creepage force on rail corrugation on low rail at sharp curves, *Wear*, Vol. 253, Issues 1-2, pp. 172-177, 2002.

(Received April 1, 2022)

(Accepted June 3, 2022)

VIBRATION-BASED MONITORING METHOD FOR IDENTIFYING THE GROWTH PROCESS OF RAIL CORRUGATION

Kazuhiro KAJIHARA and Hirofumi TANAKA

Rail corrugation is a periodic wear pattern that forms on the rail head as the vehicle passes, causing noise, vibration and deterioration of track components, which increase the frequency of track maintenance work. However, a measurement method that efficiently evaluate the extent of rail corrugation has not been established. The authors have developed a monitoring system for rail corrugation that enables long-term remote measurement of rail vibration by means of battery-powered accelerometers and wireless sensor network. In this study, the relationship between the rail vibration characteristic and the actual rail corrugation measured on in-service line was investigated to verify the applicability of the developed system for identifying the growth process of rail corrugation.