

レール振動加速度計測によるレール波状摩耗の進展把握手法の開発

○ [土・機] 田中 博文 (鉄道総研)

[土・機] 梶原 和博 (鉄道総研)

神野 響一 (ソナス)

川西 直 (ソナス)

[土] 蘇 迪 (東京大学)

[土] 長山 智則 (東京大学)

Development of a monitoring method for assessing progress of rail corrugation by measuring rail acceleration

○ Hirofumi Tanaka (Railway Technical Research Institute)

Kazuhiro Kajihara, (Railway Technical Research Institute)

Kyoichi Jinno, (Sonas) Nao Kawanishi, (Sonas)

Di Su, (The University of Tokyo)

Tomonori Nagayama (The University of Tokyo)

Rail corrugation causes various issues, for example, noise and vibration, deterioration of track materials, and deterioration of track irregularity. Therefore, railway operators need to grasp the locations of corrugation and their conditions to maintain rails appropriately. However, an efficient method for condition monitoring of rail corrugation has not been established. In this study, we developed a condition monitoring system for rail corrugation that can continuously measure rail acceleration using wireless sensors and proposed a method for estimating the progress process of rail corrugation. Finally, the developed system was installed on a commercial line and its effectiveness was verified.

キーワード: 波状摩耗, 進展過程, 軌道, 振動加速度, レール, 無線センサ

Key Words: Corrugation, progress process, track, acceleration, rail, wireless sensor

1. はじめに

レール波状摩耗は、騒音・振動、軌道部材の劣化や軌道変位進み等を助長することから、鉄道事業者はその発生区間と程度を適切に把握し、必要に応じてレール削正等の保守を行う必要がある。一方で、レール波状摩耗の発生区間は線路に点在し、またその振幅は微小なため、その状態を効率的に把握する手法は確立されていない。そこで、著者らは、レール波状摩耗の状態把握手法に関する研究の一環として、営業線においてレール波状摩耗の凹凸を継続的に測定し、その結果に基づき、レール波状摩耗の進展過程モデルを提案している¹⁾。しかしながら、レール凹凸を高頻度に直接測定することは困難を伴う。そこで、レール凹凸の直接測定によらないレール波状摩耗の状態把握手法として、無線式加速度センサを用いた進展把握システムの開発を進めている²⁾。

本研究では、無線式加速度センサを用いて、レール振動加速度を継続測定可能なレール波状摩耗の進展把握システムを構築するとともに、レール波状摩耗の進展度合いの把

握手法を検討した。その後、構築したシステムを営業線に試験導入し、その効果を検証した。

2. レール波状摩耗の進展過程と飽和期の特徴

2.1 レール波状摩耗の進展過程

図1に、著者らが提案しているレール波状摩耗の進展過程モデルを示す。本モデルは、営業線におけるレール波状摩耗の凹凸の継続測定結果に基づいており、レール波状摩耗

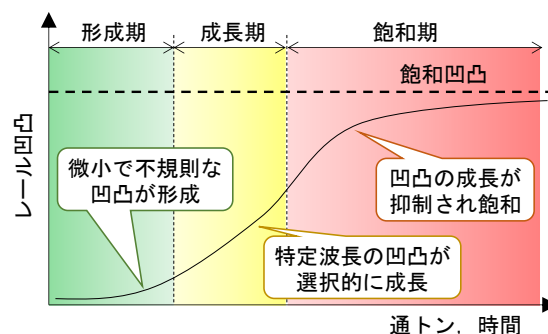


図1 レール波状摩耗の進展過程モデル

の進展過程には、形成期、成長期、飽和期の3段階があると考えている。形成期は微小で不規則な凹凸が形成される段階、成長期はそこから特定波長の凹凸が成長しレール波状摩耗として顕在化する段階、飽和期は凹凸の成長に伴って車輪がレール凹凸に追従できなくなりレール凹凸の成長が抑制される段階である。このようなレール波状摩耗の進展過程は、数値解析においても同様の傾向を再現できている³⁾。

2.2 飽和期のレール波状摩耗の特徴

飽和期に達したレール波状摩耗の凹凸形状は、正弦波状から三角波状に変化することが、営業線における測定⁴⁾、および数値解析³⁾によって確認されている。これに伴い、凹凸測定ではレール波状摩耗の凹凸波形の基本の空間周波数の高次成分が出現することが確認されている。また、図2に示すように、数値解析ではレール凹凸に追従できなくなった車輪がレールから離れレールを衝撃的に加振し、軌道や車両の応答にも基本周波数の高次成分が出現することが予想されている。ここで、レールと車輪が離れる割合は、解析上、レールと車輪の接触力が0になる時間の割合を示している。このような高次成分の出現は、過去に著者らが、波状摩耗発生区間を走行する車両の軸箱加速度を測定した際や、波状摩耗発生区間の軌道でレール振動加速度を測定した際に一部の事例においても確認されている。

3. 構築した進展把握システムの概要

3.1 軌道設置型の進展把握システムの構成

前述したようなレール波状摩耗の進展過程における飽和期の特徴を、軌道に設置した観測機器で常時監視する方法として、レール振動加速度の常時監視による進展把握システム²⁾を検討した。図3に、軌道内への設置を前提とした進展把握システムの構成を示す。本システムは、現地側システムと事務所側システムによって構成される。現地側システムは、軌道内への機器設置を最小限とするために、軌道内には無線式加速度センサ（センサユニット）のみを設置し、その近傍の軌道外にベースユニットを設置する構成とする。センサユニットは電池駆動とし、ベースユニットは商用電源駆動とする。センサユニットとベースユニット間は、専用の無線ネットワークで通信する。レール振動加速度の測定データは、ベースユニット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する。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、頻繁に現地に赴かずとも、常時、レール振動加速度の測定が可能となる。

3.2 進展把握システムに使用する計測機器

前述のような長期間にわたる継続測定可能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モニタリングや、老朽構造物の健全度診断モニタリングのために実用化されている類似のシステム⁵⁾を活用可能と考えられる。

ここで、レール波状摩耗の基本周波数は、その成長要因にもよるが数十 Hz～数百 Hz であることがわかっている

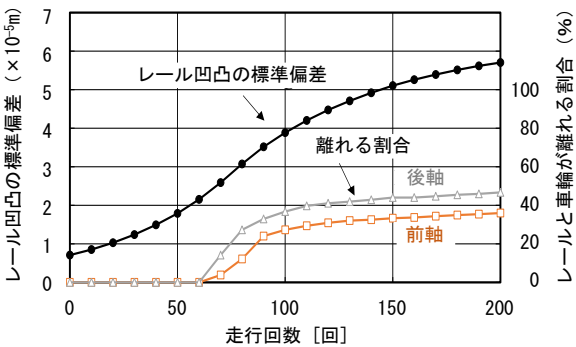


図2 数値解析による飽和期の再現³⁾

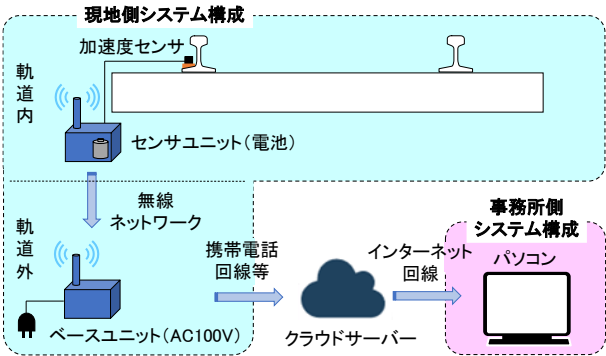


図3 レール振動加速度による進展把握システムの構成

表1 無線式加速度センサの主な性能

装置型番	sonas x02	
仕様	長期計測用	
センサ性能	計測値	3軸加速度
	計測範囲	±40G
センサ部寸法		40×30×15mm
ユニット性能	保護等級	IP65相当
	内蔵ストレージ	フラッシュメモリ32GB
	内蔵バッテリー	単1電池×5
ユニット部寸法		75×120×100mm
計測周波数		最大2000Hz

4). そのうち、100～300Hz 程度のものが日本では多く確認されており、その高次成分を観測するには、1000Hz 以上のサンプリング周波数が必要となる。また、過去の測定事例より、レール波状摩耗の発生区間のレール振動加速度は、大きくても数百 m/s²程度であると考えられる。

このような振動現象を観測するために、本研究では、表1に示すような性能を有する加速度センサの活用を検討した。当該センサは、構造物モニタリングの分野で既に活用されているものであり、無線通信に対応しており、かつ電池での長期間駆動が可能である。なお、鉄道は、運行ダイヤにしたがって間欠的に車両が走行するものの、ダイヤ乱れ等もしばしば発生する。そこで、構築した測定システムでは、列車通過時の振動をトリガーとして前後一定時間の振動データを収集し、内蔵 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ように設定し、電池消費を抑制するようにした。

4. 営業線における試験運用結果

4.1 試験箇所の概要

構築した進展把握システムの性能および有効性を検証す

るために、営業線において試験運用を実施した。試験を実施した線区は、年間通過トン数が約 1800 万トンであり、2 種類の通勤形車両が走行している路線である。この路線のうち、地下のトンネル内に位置する半径 185m の急曲線に、進展把握システムを設置した。センサユニット設置箇所は、直結系軌道（防振まくらぎ直結軌道）であり、内軌に波状摩耗が発生していた。センサユニット設置箇所の列車の通過速度は 45km/h 程度である。この曲線では、波状摩耗の凹凸除去のために、毎年レール削正車によるレール削正作業が実施されていたが、削正から数箇月で削正前の状態にまで波状摩耗が再発生し、鉄道事業者はその保守に苦慮している¹⁾。

4.2 進展把握システムの軌道への設置状況

図 4 に、進展把握システムのセンサユニット設置箇所における設置時の内軌波状摩耗の発生状況を示す。なお、当該軌道において発生していたレール波状摩耗の波長は、90mm 程度、飽和時の凹凸は、0.1mm 程度以下であった。図 5 に、進展把握システムのうち、軌道内に設置したセンサユニットの状況を示す。センサユニットのセンサ部は、レール締結装置間のフィールドコーナー側のレール底部にベークライトを介してエボキシ系接着剤で固定した。本体部は、センサ設置箇所に隣接するまくらぎの端部上面に同じくエボキシ系接着剤で固定した。なお、サンプリング周波数は、2000Hz とした。

この他に、近隣の駅のホーム下にデータ収集のためのベースユニットを、センサユニットとベースユニット間のトンネル通路にはデータ通信を中継するためのリレーユニットを、それぞれ設置した。なお、センサユニットとリレーユニットは電池駆動とし、ベースユニットは商用電源（AC100V）から給電した。

本システムによる測定は、レール削正約 1 ヶ月前から開始し、レール削正から約 8 か月経過までのデータを取得した。その間、センサユニットについては、1 回電池交換を実施した。また、レール削正は、16 頭式のレール削正車で 16 パス実施されており、別途実施したレール凹凸測定により、レール凹凸は概ね除去されたことを確認している。

4.3 レール振動加速度の分析結果

図 6 に、レール振動加速度の波形例を示す。同図には、レール削正直前（2 日前）および直後（5 日後）、レール削正 40 日後、131 日後、201 日後、250 日後に測定した生波形（2000Hz サンプリングの時刻歴波形）を示している。同図より、削正前は片振幅のピーク値で 200m/s^2 を超過していた加速度が、削正直後には片振幅のピーク値で 50m/s^2 以下にまで低減した。その後、再度増加し始め、削正 201 日後には削正前と同程度まで増加していることがわかる。

図 7 に、レール振動加速度のパワースペクトル（以下、PSD という）の例を示す。同図には、図 6 に示した各波形に対応する PSD を示している。同図より、削正前には 130Hz 帯域にレール波状摩耗の基本周波数に起因する明瞭なピークが確認できる。その後、レール削正直後には、



図 4 センサユニット設置箇所の内軌波状摩耗の発生状況

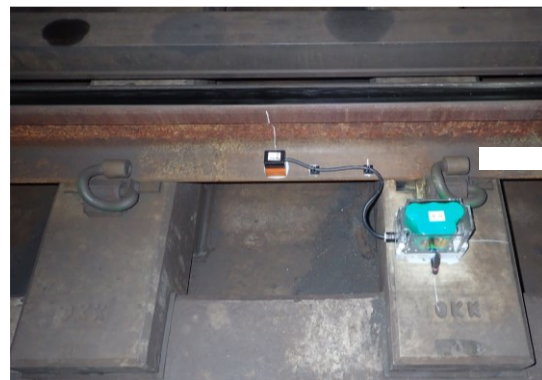


図 5 軌道内へのセンサユニットの設置状況

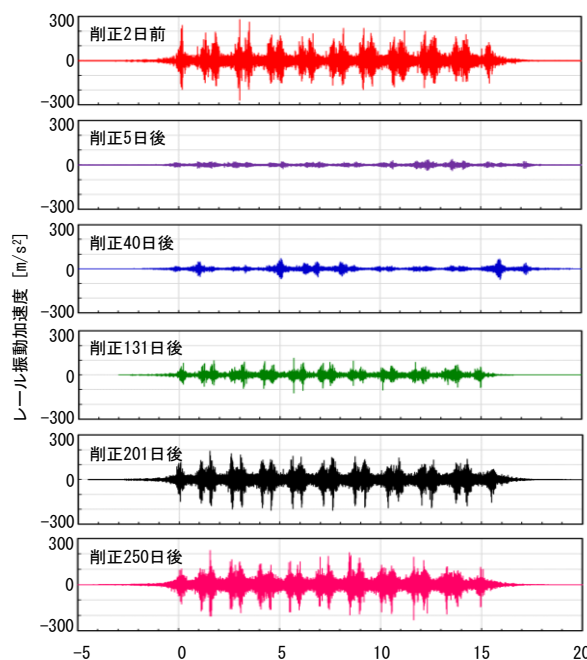


図 6 レール振動加速度の波形例

その帯域のピークは大幅に低減するが、明瞭なピークは残存している。これは、レール波状摩耗の成長要因による加振に起因する成分であると考えられる。一方で、450Hz 付近に鋭敏なピークが出現している。これは、レール削正痕に起因するピークである。その後、日数が経過とともに、削正から 131 日後の PSD では 130Hz 帯域のピークが成長するとともに、その高次成分と考えられる 260Hz 帯域のパワーも増大している。そして、削正から 201 日後の PSD

では、削正前と概ね同等の特性に戻っていることが確認できる。なお、20Hz および 60Hz 付近にも明瞭なピークが見られる場合がある。これは車両形式の違いによるものの可能性があるが詳細は不明である。

図 8 に、レール振動加速度のピークパワーの推移を示す。同図には、図 7 に示した PSD で確認された 130Hz および 260Hz 帯域のピークパワーの推移を示している。ピークパワーは、前述の各周波数帯域の前後 40Hz における最大値とした。同図より、ある程度のばらつきはあるものの、130Hz 帯域のピークパワーの推移は、削正前は $10(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$ 程度であったものが、削正直後にはほぼ 0 にまで低下し、その後 100 日を超えてもその状態を維持していた。この期間は、レール波状摩耗の進展過程は、形成期から成長期の間であり、車輪がレール凹凸に追随しながら転動しているものと考えられる。さらに時間が経過し、130 日後あたりから急激に増加し始めている。このあたりで、レール凹凸の成長に伴って車輪がレール凹凸に追随できなくなり、レール波状摩耗の進展過程は、成長期から飽和期に移行したと考えられる。その後、削正から 250 日後には削正前と同程度にまで増加しており、レール凹凸の成長が概ね収束したものと考えられる。一方で、260Hz 帯域のピークパワーの推移については、全体的にパワーは小さいものの、概ね 130Hz 帯域のピークパワーの推移と同様の傾向を示していた。この一連の経過は、図 2 に示したように別途実施した数値解析において再現されたレール波状摩耗の進展過程を概ね整合している。

なお、ピークパワーの推移に見られたデータのばらつきは、センサ設置箇所を通過する際の列車速度のばらつきや、車両形式や車輪踏面状態の違いが影響しているものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、無線式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開発するとともに、開発したシステムを営業線に試験導入し、その有効性を検証した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 営業線に設置した測定機器は、設置から約 9 か月を経過しても継続して測定できており、鉄道の営業線におけるレール波状摩耗の進展把握システムとして長期の継続測定に適用可能と考えられる。
- (2) 営業線においてレール振動加速度を継続して測定した結果、レール削正から一定期間は大きな加速度は発生していなかったが、その後、大きな加速度が発生し始めた。このことは、測定箇所のレール波状摩耗の進展過程が、形成期から成長期を経て、飽和期に達したことを観測したものと考えられる。

最後に、開発した進展把握システムを用いることで、レール波状摩耗の凹凸を直接測定せずとも、レール波状摩耗の進展度合いを間接的に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

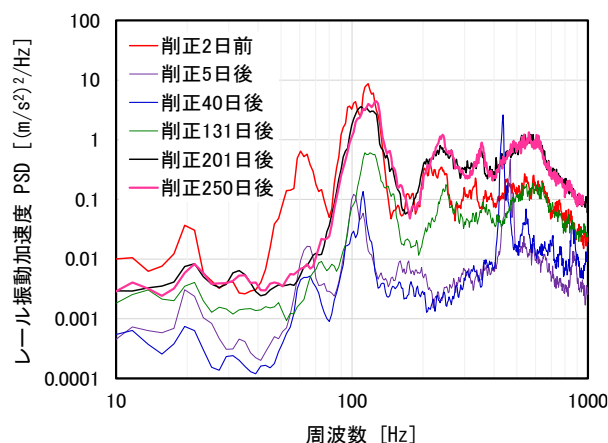


図 7 レール振動加速度の PSD の例

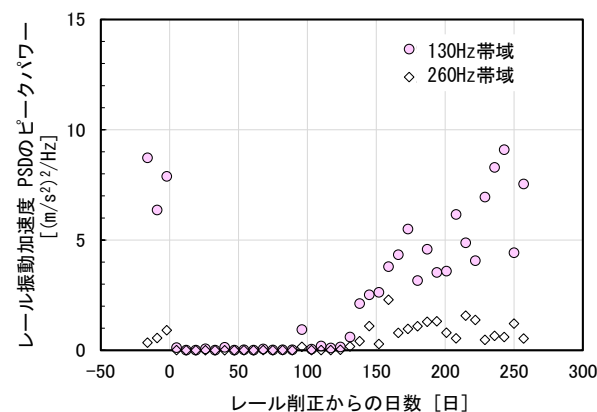


図 8 レール振動加速度のピークパワーの推移

所に、開発した進展把握システムを設置し、更なる検証を実施する予定である。また、システムから得られる膨大なデータを効率的に処理・分析するためのソフトウェアの開発にも取り組む予定である。

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 年度年次大会講演概要集, No.G1800204, 2017.
- 2) 田中博文, 梶原和博, 神野響一, 川西直, 蘇迪, 長山智則: 振動モニタリングによるレール波状摩耗の進展過程システムの開発, 令和 2 年度土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会講演概要集, VI-532, 2020.
- 3) 網干光雄, 田中博文: 理論・数値解析に基づくレール波状摩耗の成長機構と進展過程, 鉄道総研報告, Vol.34, No.4, pp.11-16, 2020.
- 4) 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.16-21, 2020.
- 5) 鈴木誠, 長山智則, 大原壮太郎, 森川博之: 同時送信型フラットニ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.