

# 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

田中 博文\* 梶原 和博\* 網干 光雄\*\*

Verification of Growth Mechanism and Evolution Process of Rail Corrugation  
by Measuring Rail Surface Roughness of Commercial Lines

Hirofumi TANAKA Kazuhiro KAJIHARA Mitsuo ABOSHI

Rail corrugation is a phenomenon, in which roughness patterns of approximately regular wavelengths are formed on the rail surface by trains running, and causes the vibration and the noise. In the previous paper, the authors have already analyzed the growth mechanism and the wavelength determination mechanism of the rail corrugation from the viewpoint of dynamics. In this paper, the characteristics of the corrugation measured in commercial lines are compared with the theoretical values. From these results, it is confirmed that the wavelengths of the corrugation well agree with the theoretical values and the each of growth factors is identified. Finally, the proposed growth mechanism and the evolution process of the rail corrugation have been verified.

キーワード：レール，波状摩耗，成長機構，波長決定メカニズム，進展過程，反共振現象

## 1. はじめに

レール波状摩耗は、図1に示すように、車両の走行に伴って軌道のレール頭頂面に規則的な波長の凹凸パターンが形成される現象で、振動や騒音の発生原因となっている。レール波状摩耗は、発生箇所や波長などにさまざまな形態が見られ、発生メカニズムについても多くの調査や研究<sup>例えは1)~4)</sup>が行われているが、この現象の発生機構や波長決定メカニズムは十分解明されているとは言えない。

そこで著者らは、国内の営業線のレール凹凸を測定し、波状摩耗の発生状況を調査するとともに、理論解析による波状摩耗の成長機構と波長決定メカニズムの提案<sup>5)</sup>、ならびに数値シミュレーションによる波状摩耗の進展過程の解析<sup>6)</sup>を行ってきた。本論文では、国内の営業線8路線15事例のレール凹凸測定結果に基づき、波状摩耗の発生状況と理論解析結果を比較することで、本誌掲載の別論文<sup>7)</sup>で示した波状摩耗の成長機構と進展過程の妥当性を検証する。

なお本論文の内容は、上記論文<sup>7)</sup>と密接に関連しているので、あわせて参照されたい。

## 2. 波状摩耗の成長機構と進展過程

図2および図3に示すように、凹凸のある弾性支床梁



図1 レール波状摩耗の例

(軌道)上をばね・質点系モデル(車両)が走行するモデルによる理論解析から、1輪軸走行後の凹凸振幅は走行前のそれに比べて、式(1)のように $\kappa$ 倍となることが示される<sup>5)</sup>。

$$\kappa = |1 + C_w H| \quad (1)$$

ここで、 $C_w$ は単位輪重あたりのレールの摩耗量(本論文では $C_w=10^{-15}$ mm/Nで一定と仮定する)、 $H$ は凹凸振幅に対する輪重変動の伝達関数であり、 $\kappa$ を凹凸振幅増幅係数という。なおその他のパラメータの詳細については文献7を参照されたい。

この凹凸振幅増幅係数が1以上で極大となる波長において、レール凹凸の振幅が車両走行に伴って選択的に成長し、波状摩耗として顕在化すると考えられる。これが波長決定メカニズムであり、さまざまな発生形態に対して動力学観点から統一的に説明することができる。凹凸

\* 軌道技術研究部 軌道管理研究室

\*\* 研究開発推進部

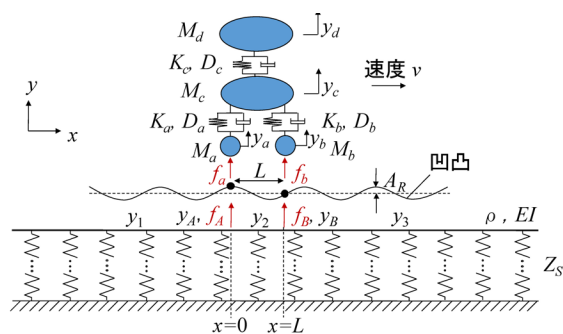


図2 弾性支床梁とばね・質点系による解析モデル

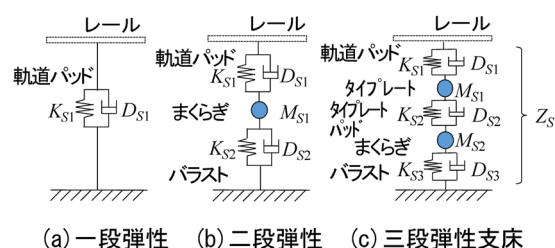


図3 軌道の弾性支床モデル

振幅係数が極大となるのは、軌道と車両の直列機械インピーダンスが極大になることであり、波状摩耗の成長要因として、①軸距間でのレール波動の干渉、②軌道弾性支床の反共振現象、③軌道・車両全体系の反共振現象、④車両系の反共振現象が挙げられる<sup>5)</sup>。

一方、数値シミュレーションによる解析からは、車輪・レール間の接触長さ（コンタクトパッチのレール方向の長さ）が長いほど短波長側の凹凸成長が抑制されること、また凹凸振幅が増加して車輪がレールから離れるようになると波状摩耗の成長が抑制され、凹凸振幅が飽和することなどが示される<sup>6)</sup>。そして波状摩耗は、形成期、成長期、飽和期の過程を経て進展するものと考えられる。

### 3. レール凹凸の測定手法

営業線におけるレール凹凸の測定には、レール凹凸連続測定装置<sup>8)</sup>を用いた。これは、非接触のレーザー変位センサーを不等間隔に配置することで構成された偏心矢によりレール凹凸を連続測定するものである。本装置をレールに載線して、人力で移動させながらレール凹凸を測定することができる。

図4に、レール凹凸連続測定装置による測定状況を示す。この装置が計測可能な空間周波数は0.8～33(1/m)（波長0.03～1.25m）、レール凹凸の振幅方向の測定分解能は0.001mmである。測定速度は4km/hを標準とするが、レールに押し付けたロータリエンコーダで測定距離を計測しており、測定速度が変化しても測定可能である。



図4 レール凹凸連続測定装置による測定状況

### 4. 成長機構と波長決定メカニズムの検証

本章では、国内の営業線8路線15事例のレール凹凸測定結果のうちから、2章で述べた波状摩耗の成長要因別に事例のいくつかを紹介するとともに、理論解析結果との比較を示す。

#### 4.1 ①軸距間でのレール波動の干渉による事例

営業線Aで測定した区間の軌道構造は直結軌道（図3の(a)一段弾性支床）で、線形は直線である。この測定区間内に駅はなく列車速度はほぼ一定である。図5に示すように、波長40mm程度の波状摩耗が発生していることを現地において確認している。

図6に、レール凹凸の測定例を示す。図中の凹凸BPの波形は、波状摩耗を見やすくするため、測定された凹凸波形に空間周波数（波長の逆数）15～30(1/m)の



図5 波状摩耗の外観（営業線A）  
（①軸距間でのレール波動の干渉による例）

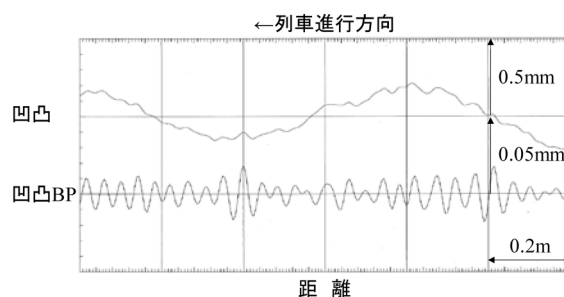


図6 レール凹凸の測定例（営業線A）

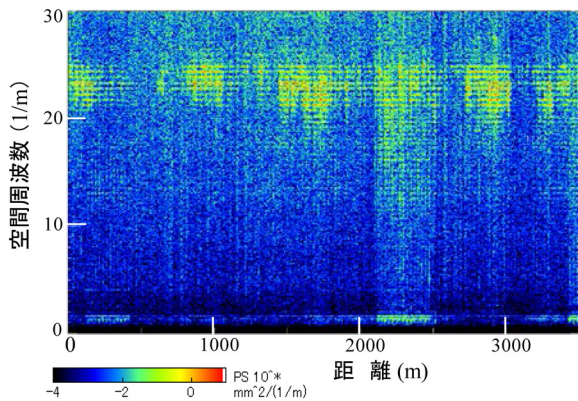
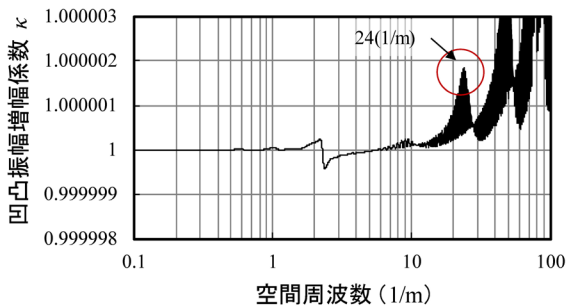
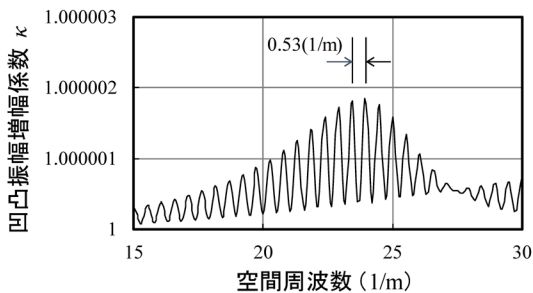


図7 レール凹凸の STFT (営業線 A)



(a) 全範囲



(b) 空間周波数 15~30(1/m)の拡大

図8 凹凸振幅増幅係数 (営業線 A の条件で計算)

バンドパスフィルターを通したものである。凹凸振幅は 0.02mm (全振幅) 前後でやや不規則だが、波長 40mm 程度の波状摩耗が確認できる。

図7に、レール凹凸の短時間フーリエ変換 (STFT) 結果を示す。STFT の算出は、凹凸の空間周波数特性を考慮して 1(1/m) を基準として  $10^{-3}$  の通減乗則で補正したうえで、最大値を  $10\text{mm}^2/(1/m)$ 、最小値を  $10^{-4}\text{mm}^2/(1/m)$  としてその間をカラー表示で示している (赤色が強度が強く、青色が小さい)。縦方向に見えるスペクトル線はレール継目部における凹凸によるものである。一方、横方向に見えるスペクトル線が波状摩耗によるものである。空間周波数 20 ~ 25(1/m) 付近に、規則的な間隔で空間周波数成分が増減する比較的顕著な凹凸が見られる。



図9 波状摩耗の外観 (営業線 B)  
(①軸距間でのレール波動の干渉によるその他の例)

図8(a)に、式(1)に基づいて計算した凹凸振幅増幅係数を示す。計算条件は、当該区間の軌道条件と当該区間を走行する代表的な車両を想定し、図2および図3のモデルに当てはめてパラメータを設定した。軸距は 1.9m、列車速度は 110km/h とした。また、空間周波数 15 ~ 30(1/m) (同図 (a) 中の赤丸付近) を同図 ((b) に拡大して示す。

この凹凸振幅増幅係数は、空間周波数 20 ~ 25(1/m) 付近で極大が見られること、また極大となる空間周波数の間隔は軸距 1.9m の逆数に一致することなど、現地における波状摩耗の発生状況とほぼ合致することがわかる。したがってこの波状摩耗の成長要因は、①軸距間でのレール波動の干渉によるものと考えられる。

なお図8(a)には 40(1/m) 以上の空間周波数にも凹凸振幅増幅係数の極大がある。測定器の測定可能な空間周波数の上限は 33(1/m) であり定量的な確認はできないが、現地での目視ではこのような極短波長の顕著な凹凸は確認されていない。これは2章で述べたように、車輪・レール間の接触長さの影響により短波長側の凹凸成長が抑制されているものと考えられる<sup>6)</sup>。

この他に、①軸距間でのレール波動の干渉によるものとして特定された例としては、図9に示すように、無道床橋りょう上での波長 50mm 程度の波状摩耗(営業線 B) などがある。

#### 4.2 ②軌道弾性支床の反共振現象による事例

営業線 C で測定した区間の軌道構造はバラスト軌道 (図3の (c) 三段弾性支床) であり、曲線を含む約 4km の区間内に 4 駅ある。列車速度は 0 ~ 67km/h で変化するが、走行車両は同一編成両数の電車であり、列車種別も単一 (普通列車のみ) である。図10に示すように、曲線半径や列車速度の異なる複数の曲線区間の内軌において、波長 30 ~ 100mm 程度の波状摩耗が発生していることを現地において確認している。

図11に、片側のレール凹凸の STFT の例を示す。図中の凹凸 BP の波形は、波状摩耗を見やすくするため、測定された凹凸波形に空間周波数 10 ~ 30(1/m) のバン



図 10 波状摩耗の外観（営業線 C）  
 (②軌道弾性支床の反共振現象による例)

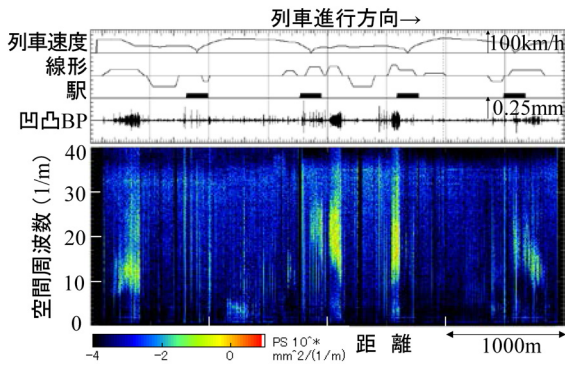


図 11 レール凹凸の STFT の例（営業線 C）

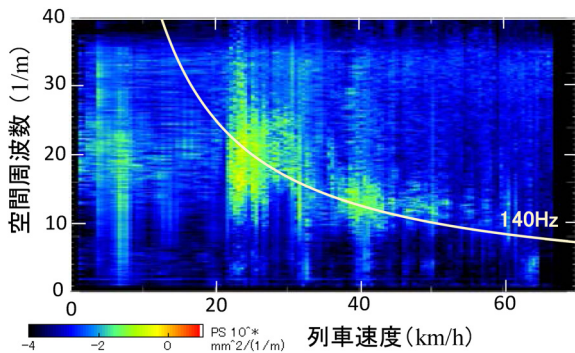


図 12 レール凹凸と列車速度との関係（営業線 C）

ドパスフィルターを通したものである。波状摩耗は曲線区間に発生しており、波状摩耗の空間周波数も広く分布していることがわかる。

図 12 に、レール凹凸の STFT を、運転曲線の列車速度毎に平均して色表示したものを示す。波状摩耗が発生している範囲は、列車速度で 20～60km/h、空間周波数で 10～30(1/m) と幅広く分布しているが、空間周波数は列車速度に反比例する傾向が見られる。

図 13 に、式 (1) に基づいて計算した凹凸振幅増幅係数の列車速度 40km/h の場合を示す。計算条件は、当該区間の軌道条件と車両条件を想定しており、約 12(1/m) 付近に極大が見られる（図中の赤丸）。

図 14 に、軌道弾性支床の加振点インピーダンスを示

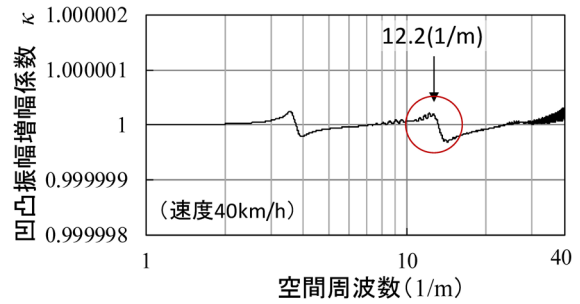


図 13 凹凸振幅増幅係数（営業線 C の条件で計算）

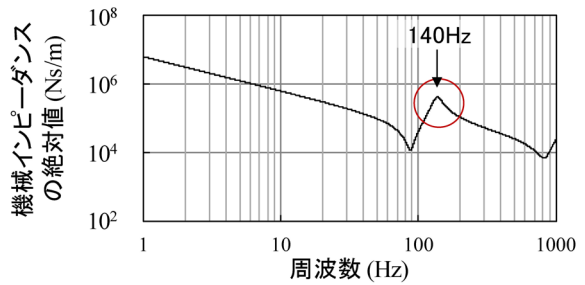


図 14 軌道弾性支床の加振点インピーダンス  
 (営業線 C の条件で計算)



図 15 波状摩耗の外観（営業線 D）  
 (②軌道弾性支床の反共振現象によるその他の例)

す。140Hz 付近に極大があり（図中の赤丸）、図 12 中に 140Hz に相当する曲線を重ね書きすると、列車速度と波状摩耗の空間周波数との関係に概ね合致することがわかる。したがってこの波状摩耗の発生要因は、②軌道弾性支床の反共振現象によるものと考えられる。

波状摩耗の空間周波数が列車速度に反比例するのは、軌道弾性支床の反共振周波数が軌道固有の特性に依存するからである。この場合の反共振現象は、まくらぎが大きく振動する振動形態となっている。なお、一段弾性支床では反共振周波数が存在しないので<sup>5)</sup>、この成長要因による波状摩耗は発生しない。

この他に、②軌道弾性支床の反共振現象によるものとして特定された例としては、図 15 に示すように、弾性まくらぎ直結軌道（二段弾性支床）での波長 50～100mm 程度の波状摩耗（営業線 D）などがある。



図 16 波状摩耗の外観（営業線 E）  
（③軌道・車両全体系の反共振現象による例）

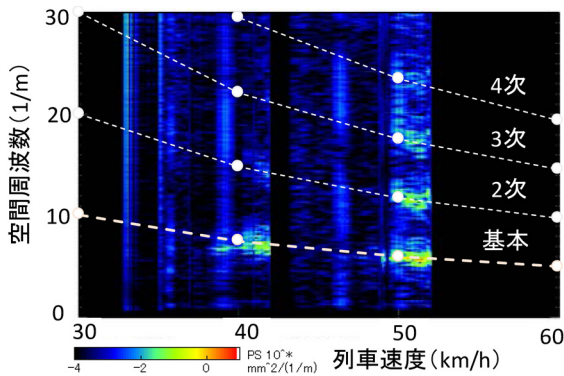


図 17 レール凹凸と列車速度との関係（営業線 E）

#### 4.3 ③軌道・車両全体系の反共振現象による事例

営業線 E で測定した区間は、長さ 200~300m の複数の曲線区間であり、軌道構造は直結軌道（図 3 の (a) 一段弾性支床）、測定区間での列車速度は 40 または 50km/h 程度、列車種別は単一である。図 16 に示すように、曲線区間の外軌において、波長 150mm 前後の波状摩耗が発生していることを現地において確認している。

図 17 に、レール凹凸の STFT を、運転曲線の列車速度毎に平均して色表示したものを示す。波状摩耗の空間周波数は 5~8(1/m) 程度で、列車速度に反比例する傾向が見られる。またこの区間では高次の凹凸成分が見られることが特徴であるが、これについては次章で後述する。

図 18 に、式 (1) に基づいて試算した凹凸振幅増幅係数を示す。計算条件は、当該区間の軌道条件と車両条件を想定し、列車速度を 30~60km/h とした。凹凸振幅増幅係数は空間周波数 5~10(1/m) 付近に極大が見られ、極大空間周波数は列車速度にほぼ反比例する。図 17 に、理論解析で求めた波状摩耗の空間周波数（基本）を上書きするが、現地での発生状況とほぼ合致することがわかる。図 18 の列車速度と極大となる空間周波数から換算すると、周波数はいずれも 80Hz 程度となる。

図 19 に、当該区間の軌道条件と車両条件を想定して求めた軌道と車両の加振点インピーダンスの絶対値を示

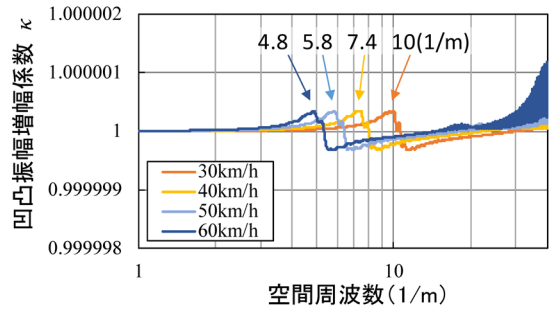


図 18 凹凸振幅増幅係数（営業線 E の条件で計算）

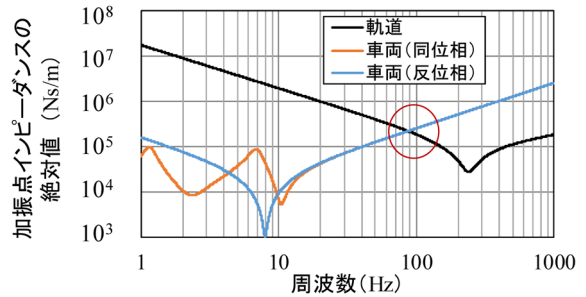


図 19 軌道と車両の加振点インピーダンス  
（営業線 E の条件で計算）

す。ただし車両については、2つの輪軸の加振位相（同位相と反位相）の 2 例を示した。上記の周波数においては、車両は輪軸の質点として、軌道はばねとしての挙動を示すこと<sup>5)</sup>、また両者の絶対値がほぼ同じであることがわかる（図中の赤丸）。これにより軌道・車両の直列機械インピーダンスが極大となるため<sup>5)</sup>、この波状摩耗の成長要因は、③軌道・車両全体系の反共振現象によるものと考えられる。

波状摩耗の空間周波数が列車速度に反比例するのは、軌道と車両の加振点インピーダンスの絶対値が等しくなる周波数が双方の構造により決定されるからである。

この他にも、③軌道・車両全体系の反共振現象によるものは、例えば営業線 A の空間周波数 2(1/m) 前後（図 7~8）や営業線 C の空間周波数 5(1/m) 程度以下（図 11~13）のように、短波長の波状摩耗に混在して見られる例も多い。

#### 4.4 波状摩耗の成長要因別の分類と特徴

表 1 に、上記以外の検証例を含めてこれまで著者らが国内の営業線 8 路線 15 事例において検証してきたレール波状摩耗について、成長要因別に分類して波長などの特徴を示す。

成長要因別に波状摩耗の特徴が見られ、①軸距間でのレール波動の干渉によるものは波長が一般的に短く、③軌道・車両全体系の反共振現象によるものは波長が長い。②軌道弾性支床の反共振現象によるものはこれらの中間

表1 波状摩耗の成長要因別分類と特徴  
(測定した8路線15事例のまとめ)

波状摩耗の成長要因	空間周波数 (1/m)	波長 (mm)	列車速度 (km/h)	周波数 (Hz)	軌道条件
①軸距間でのレール波動の干渉	12-33	30-83	55-119	230-1000	内軌, 外軌, 直線
②軌道弾性支床の反共振現象	3.9-26	38-260	22-120	110-330	内軌, 外軌
③軌道・車両全体系の反共振現象	1.0-12	83-1000	37-115	19-130	内軌, 外軌, 直線

である。なお、④車両系の反共振現象によるものは発生条件が限定的であり<sup>5)</sup>、これまでに営業線で特定された事例はない。

## 5. 進展過程の検証

図20に、営業線Eにおいて定期的にレール凹凸を測定した結果を時系列で比較して示す。測定間隔は約6ヶ月で、距離方向の位置はレール継目位置に合わせて示している。凹凸波形は、波状摩耗を見やすくするため、空間周波数2(1/m)以上のハイパスフィルターを通したものを示している。

この箇所の波状摩耗の波長は約170mmであり、時系列にしたがって凹凸振幅が増加する様子が見られるが、第4回測定では凹凸振幅がやや飽和する傾向が見られる。またその際に凹凸波形は正弦波から変形している様子が確認できる。この現象は、数値シミュレーションでも予測されおり<sup>6)</sup>、図17に示したように、波状摩耗の基本空間周波数に対して高次の凹凸成分が見られることでもわかる。この区間以外にも今回の測定において、波状摩耗の空間周波数に対して高次の凹凸成分が見られる事例は多数確認されており、波状摩耗の進展過程としては飽和期に入っている例が多いものと考えられる。

図20には、時系列にしたがって凹凸波形が列車進行方向に移動していく様子も捉えられており、これらの現象は数値シミュレーションで予測した特性<sup>6)</sup>と合致する。

## 6. まとめ

本論文では、本誌掲載の別論文<sup>7)</sup>で示した波状摩耗の成長機構と進展過程について、国内の営業線8路線15事例で確認した波状摩耗の発生状況を理論解析結果と比較することでそれらの妥当性を検証した。主な結果は、以下のとおりである。

- (1) 営業線で確認された波状摩耗の波長は理論解析による計算値とほぼ一致し、成長機構および波長決定メカニズムは妥当と考えられる。
- (2) 波状摩耗の成長要因として、①軸距間でのレール波

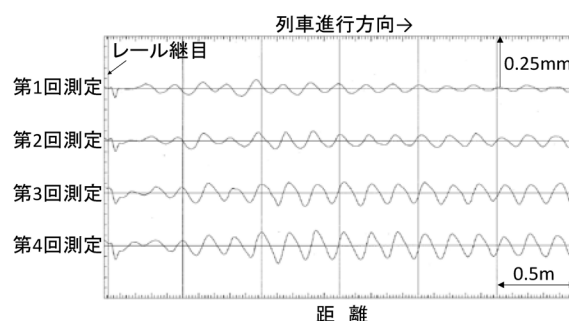


図20 波状摩耗の凹凸波形の時系列変化(営業線E)

- 動の干渉、②軌道弾性支床の反共振現象、③軌道・車両全体系の反共振現象によるものを特定した。
- (3) 波状摩耗の凹凸振幅が飽和傾向にある箇所があること、また高次の空間周波数成分が見られるなど、数値シミュレーションで予測した現象を営業線でも確認した。
- (4) 以上のことから、先に示した波状摩耗の成長機構と進展過程は妥当なものと考えられる。

## 文献

- 1) 須田義大, 井口雅一, 今泉博英, 谷口雅昭: コルゲーションの成長・減衰機構の研究(第1報), 日本機械学会論文集C編, Vol.54, No.499, pp.537-543, 1988
- 2) Grassie, S. L., Kalousek, J., "Rail corrugation: characteristics, causes and treatments," Proc.IMEchE, Part F, Vol.207, pp.57-68, 1993.
- 3) 松本陽, 佐藤安弘, 藤井雅子, 谷本益久, 陸康思: 曲線部に発生するレール波状摩耗の発生メカニズムに関する研究(第一報), 日本機械学会論文集C編, Vol.62, No.597, pp.49-57, 1996
- 4) Manabe, K., "A hypothesis on a wavelength fixing mechanism of rail corrugation," Proc.IMEchE, Part F, Vol.214, pp.21-26, 2000.
- 5) 網干光雄, 田中博文: レール波状摩耗の成長機構に関する理論解析, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.875, 2019
- 6) 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
- 7) 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.23-28, 2020
- 8) 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