

1804 軸箱加速度を用いたレール頭頂面凹凸経時変化予測モデル

正 [土] ○猿木 雄三 正 [土] 田中 博文 ((財)鉄道総合技術研究所)

Prediction Model for Variation of Longitudinal Rail Profiles Caused by Vehicle Running Using Axle-box Acceleration

Yuzo SARUKI, Hirofumi TANAKA Railway Technical Research Institute .
2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji, Tokyo

To operate rail grinding cars efficiently, longitudinal rail profiles should be accurately predicted. However, whereas the prediction for rail wear is well studied, the prediction for longitudinal rail profiles is hardly studied. Thus, in the present study, the prediction model for longitudinal rail profiles was studied using axle-box acceleration measured with a Shinkansen train; this model depends on the track condition and the vehicle operational condition. As a result, the adequacy of our model could be described to some extent with measured data.

Keywords: Axle-box Acceleration, Shinkansen, Longitudinal Rail Profile, Prediction Model, Rail Grinding

1. はじめに

現在、新幹線ではシェリング予防によるレール延命および転動騒音低減のためにレール削正車による削正が行われている。レール削正車を効率的に運用するためには、レール頭頂面凹凸の経時変化を精度良く推定し、適切な時点でレール削正を行う必要がある¹⁾。しかし、レールについては、これまで摩耗進みの推定モデルは提案されているものの、レール頭頂面凹凸の経時変化の推定モデルの検討例は少ない^{2),3)}。そこで本研究では、新幹線電車で定期的に測定した軸箱加速度を用いて、軌道条件や車両の運転条件(加減速等)に応じた、レール頭頂面凹凸の経時変化を予測するモデルを検討した。

2. 軸箱加速度データ

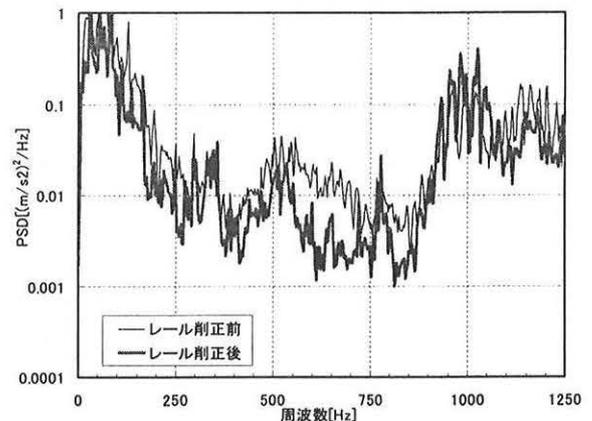
2.1 分析対象データ

本研究では、新幹線電車で測定された軸箱加速度データを解析対象とし、累積通トン約3,300万トンまでのデータを用いて解析を行った。なお、今回は下り線の左レールについてのみ解析を進め、そこからレール頭頂面凹凸の経時変化予測モデルを導き、右レールまたは上り線に当てはめてモデルの整合性を確認することとした。

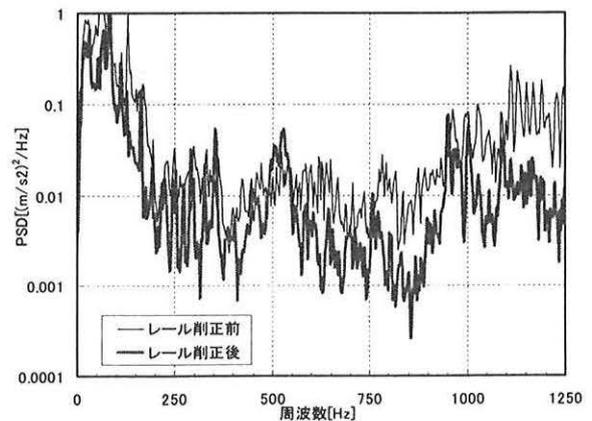
2.2 軸箱加速度のパワースペクトル

図1に、今回の検討区間におけるバラスト区間とスラブ区間の、レール削正前後の軸箱加速度のパワースペクトルの一例を示す。列車の走行速度はともに、270km/hである。レール削正後のパワースペクトルはバラスト区間、スラブ区間ともに、300Hz以上の周波数帯域を中心にパワーの低下が見られる。一般にアンブロックによるレール削正ではレール削正車の検出システムおよび砥石の径の関係から、270km/h換算で300Hz~1000Hzのレール凹凸が除去されることがわかっており、図1の区間でもこの周波数(波長)のレール頭頂面凹凸が除去できていることがわかる。なお、軸箱加速度の測定には、抵

抗線型の加速度センサが用いられており、1000Hz以上の帯域については、その検出精度を考慮し、本研究の検討から除外した。



(a) バラスト区間



(b) スラブ区間

図1 レール削正前後の軸箱加速度のパワースペクトル

3. 軸箱加速度データの分析

3.1 軸箱加速度データの分類

レール頭頂面凹凸の経時変化予測モデルの検討にあたり、①線路構造、②線路線形、③運転条件の3つの観点から分類を行い、これらの条件に応じたレール頭頂面凹凸の経時変化予測モデルを導出した。以下に、それぞれの条件における分類項目を示す。

<線路構造による分類>

①構造物による分類

盛土 / トンネル / 高架橋 / 橋りょう / 境界

②軌道構造による分類

スラブ / バラスト / 境界

<線路線形による分類>

③平面線形

直線 / 円曲線 / 緩和曲線

④縦断線形

レベル / 上り勾配 / 下り勾配

<運転条件による分類>

⑤列車速度

加速 / 減速 / 100km/h 以下 / 101~200km/h / 201~240km/h / 240km/h 以上

ここで、今回の解析条件は、ある程度のロット数が存在するように定めた。これは、組み合わせによってはデータ数がごくわずかか、または全くデータが存在しない組み合わせがあるため、分析結果を比較するデータの統計的な信頼性が低くなることを防ぐためである。表 1 に、これらを考慮した解析条件の分類の組み合わせを示す。

表 1 解析条件の分類の組み合わせ

No	構造物	軌道構造	平面線形	縦断線形	速度 (km/h)	ロット数
1	高架	バラスト	直線	レベル	240	53
2	高架	スラブ	直線	レベル	240	23
3	高架	バラスト	緩和	レベル	240	16
4	高架	バラスト	曲線	レベル	240	9
5	高架	バラスト	直線	上り	240	16
6	トンネル	バラスト	直線	上り	240	61
7	トンネル	スラブ	直線	上り	240	78
8	高架	バラスト	直線	下り	240	94
9	トンネル	バラスト	直線	下り	240	50
10	トンネル	スラブ	直線	下り	240	26
11	高架	バラスト	直線	下り	加速	12
12	高架	バラスト	直線	上り	減速	37

この各分類において、軸箱加速度の区間統計量を算出しその経時変化を解析した。ここで、区間統計量を求める場合のロット長は、短かすぎるとレール削正の作業実態に合わず、長すぎるとロット内のどの位置で著大値が出ているのかわかりづらく、また軌道状態がロット内で大きく変化した場合にその影響が平均化される。これらのことを考慮し、今回の解析ではレールの定尺長さである 25m とした。

3.2 フィルタ処理のパターン

今回の解析では、モデルの対象とする周波数帯を複数設定した。表 2 に、そのフィルタの周波数帯域を示す。①は、アンチエイリアジングフィルタ処理後の 1000Hz 以下の帯域とした。②は、輪重と関係との相関を考慮し、新連続法で取得できる 100Hz 以下の帯域とした。③~⑤では、図 1 でレール削

正後にパワースペクトルの低下が見られた周波数帯域を選定しフィルタ処理を行った。

表 2 軸箱加速度を処理する際のフィルタ周波数帯域

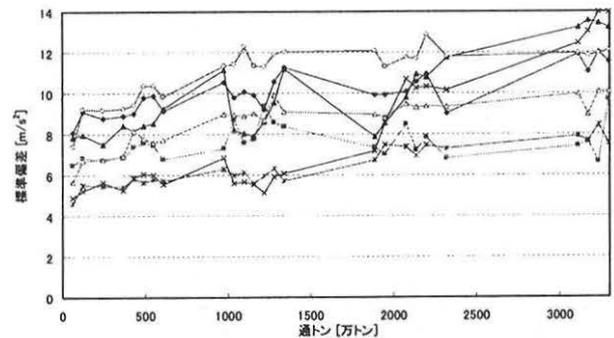
No.	フィルタ名称	目的	遮断周波数 [Hz]
①	LPF1000Hz	アンチエイリアジング	~1000
②	LPF100Hz	新連続 PQ	~100
③	BPF100Hz	レール削正影響帯域	100~1000
④	BPF300Hz	レール削正影響帯域	300~1000
⑤	BPF500Hz	レール削正影響帯域	500~1000

4. レール頭頂面凹凸の経時変化

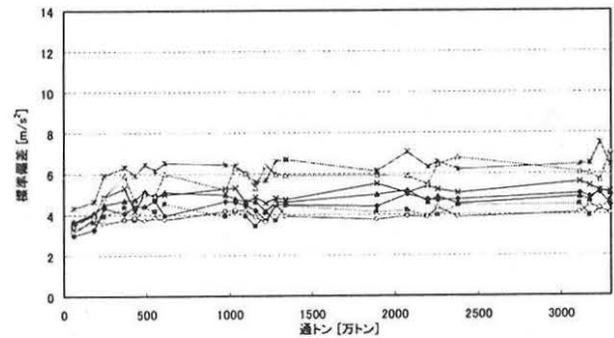
4.1 分析結果の考察

表 1 による分類で、各々の軸箱加速度データを表 2 の①~⑤の周波数帯域で解析した。なお、データ量が膨大となるため、図 2 には、一例として表 1 の No.1 の条件の 7 ロットについて、①・③・④・⑤の 4 種類のフィルタ処理結果を示す。

図 2 の各図の違いは、フィルタ処理の周波数帯域の違いによるものである。帯域が狭くなるほど標準偏差は小さくなるが、いずれのケースでも時間とともに標準偏差が増加していることがわかる。レール凹凸のマクロな経時変化を推定するためにはなるべく帯域が広い①で推定モデルを作成すべきと考えられる。しかしながら、本推定モデルはレール削正車の効率的な運用計画の策定に用いることを想定しており、④あるいは⑤のレール削正によって影響を受ける帯域を用いるのが妥当と考える。



(a) ①LPF1000Hz



(b) ②BPF100Hz

図 2 解析条件の分類 No.1 における 25m ロットの標準偏差の推移(その 1)

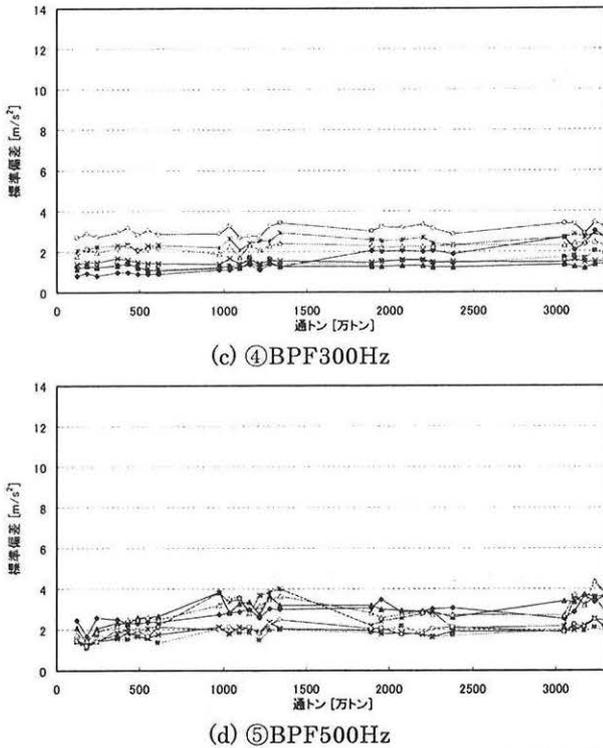


図2 解析条件の分類 No.1 における 25m ロットの標準偏差の推移(その 2)

次に、図 3 に、⑤の BPF500~1000Hz の周波数帯域における、軸箱加速度データの 25m ロット最大値の経時変化を示す。解析条件は上記の標準偏差と同様に No.1 である。

図 3 から、ロット最大値もマクロに見れば右肩上がり経時変化していることがわかるが、標準偏差に比べてかなりばらつきが大きい。他の周波数帯域でフィルタ処理を行った結果も同様であり、図 3 よりもさらにばらつきが大きい結果となった。

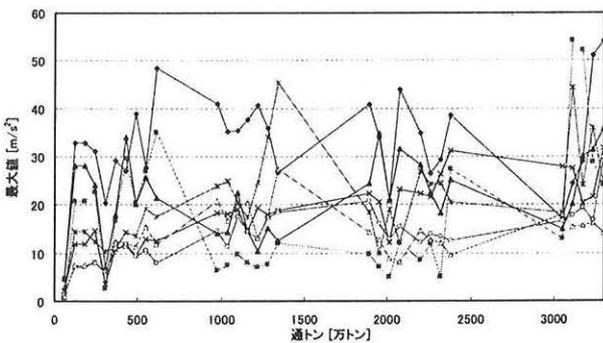


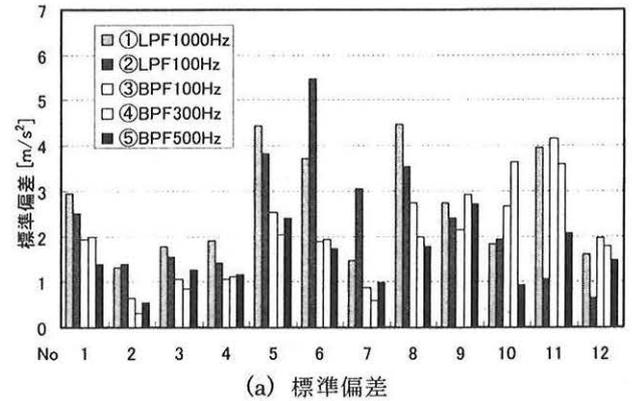
図3 解析条件の分類 No.1 における 25m ロットの最大値の推移(⑤BPF500Hz)

図 4 に、解析条件の分類、フィルタ処理のパターンの組み合わせにおける、測定列車の軸箱加速度データの 25m ロット標準偏差または最大値の標準偏差(例えば解析条件 No.1 の場合、53 個のデータの標準偏差。以下: σ_R 称す)とを示す。なお、解析条件の分類の組合せは表 1 の 1~12、フィルタ処理のパターンは表 2 の①~⑤で表す。

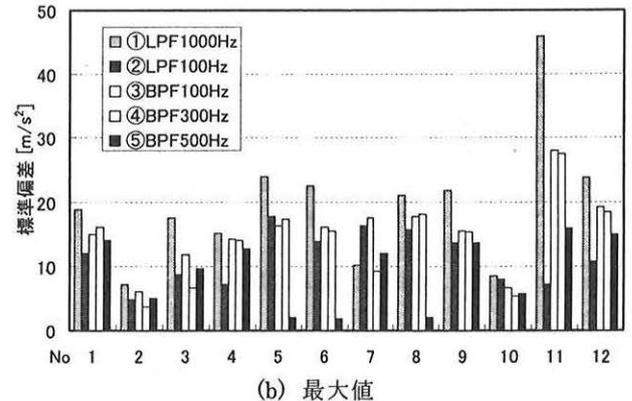
標準偏差と最大値の σ_R を比較すると、最大値のロット間のばらつきは、標準偏差のばらつきの 4~10 倍程度であることがわかる。これは解析条件毎のレール凹凸状態の違いによるものと考えられるが、レール削正車の投入箇所を選定は、あ

る区間の平均的な凹凸状態をもとに定めるべきと考えるので、以後は標準偏差を対象としてモデルを検討した。

解析条件の分類による違いは、バラスト区間とスラブ区間において、スラブ区間の方が σ_R は小さい傾向が見られたが、その他の区間では有意な差は見られなかった。



(a) 標準偏差

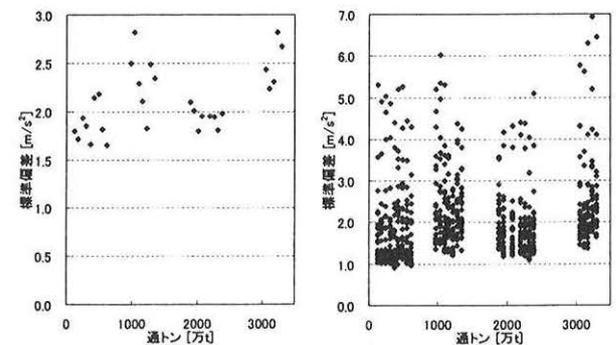


(b) 最大値

図4 解析条件の分類とフィルタ処理パターンの組み合わせの標準偏差と最大値の σ_R

4.2 レール頭頂面凹凸の経時変化指標

以上の解析結果から、レール頭頂面凹凸の経時変化予測モデルを導いた。本研究では、各ロットにおける測定日毎の平均値の回帰(以下:平均値の回帰)と、各ロットにおける各測定日の全データを用いた回帰(以下:全データの回帰)の 2 通りで近似式を導いた。図 5 に、一例として表 1 の No.1 の条件において、表 2 の⑤BPF500Hz でフィルタ処理したデータの経時変化を示す。



(a) 測定日毎の平均値

(b) 全データ

図5 軸箱加速度データの経時変化と近似式の算出方法(解析条件の分類 No.1、⑤BPF500Hz)

図5から、軸箱加速度の標準偏差は大局的には時間(通トン)のべき乗に比例して増加すると考えられることから、各ロットの標準偏差の初期値を1としたときの増加率を式(1)で表し、パラメータ α を回帰分析により求めた。

$$y = e^{\alpha x} \quad (1)$$

ここで、

y : レール頭頂面凹凸の標準偏差

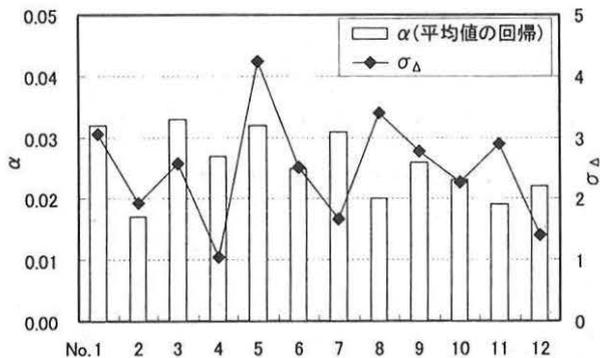
x : 通トン(1≒61万t)

α : 係数

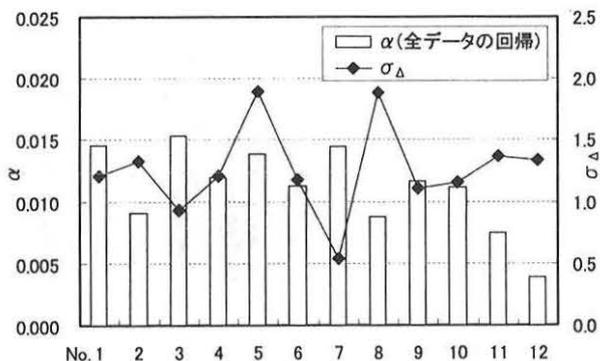
なお、以下ではレール削正車の砥石の径($\phi=180\text{mm}$)を考慮し、⑤BPF500Hzでフィルタ処理したデータに対する回帰式を示す。

図6に、フィルタ処理⑤における、式(1)の係数 α とレール頭頂面凹凸の経時変化指標 y と、式(1)を用いた3000万トン通過後の予測値と実測値との差の標準偏差(以下: σ_{Δ})を示す。図5の(a)と(b)を比較すると、(b)の、全データを用いた回帰式の方が σ_{Δ} は小さく、統計的な信頼が高いといえる。

図7に、No.1の解析条件該当区間内のあるロットの実測値と、平均値の回帰および全データの回帰を用いた予測値を示す。同図からも、全データの回帰から得られた予測値の方が実測値を良く表していることがわかる。この理由として、各測定日における標準偏差の分布は図5(b)に示すように正規分布ではなく、平均値がやや小さい側に偏った非対称の分布形状となっているため、平均値の回帰では、平均値からの離れが大きいデータの影響が消えてしまうためと考えられる。なお、他の解析条件区間や左レール、上り線においても同様の照査を行ったが、概ね同じ結果が得られた。



(a) 平均値の回帰



(b) 全データの回帰

図6 式(1)の係数 α と σ_{Δ} の関係
(解析条件の分類No.1~12、⑤BPF500Hz)

以上のことから、各解析条件に対応するレール凹凸経時変化予測モデルとして、全データの回帰から得られた α (図6(b)の α)を用いた、式(1)が妥当であるといえる。

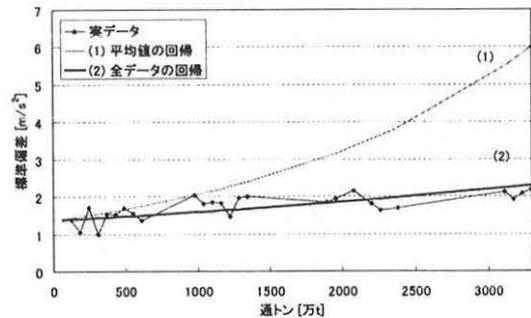


図7 レール頭頂面凹凸の実測値と予測値との比較
(解析条件 No.2、⑤BPF500Hz)

4.3 解析条件毎のレール頭頂面凹凸進みの違い

図6の α は、表1の各条件におけるレール頭頂面凹凸進みの速さの違いを意味している。全データの回帰では、特にNo.12の条件における α が小さいことから、列車の減速区間は他よりレール頭頂面凹凸の進みが遅かった。また、No.11も他よりやや小さいことから加速区間もやや遅かった。この両区間は共に他より(平均)速度が低いので、 α が小さいのは加減速の影響であるのか、平均速度が低いためであるのかは、さらに検討が必要である。

構造物の種類、軌道構造、線路線形等の条件については個々に差は見られるものの、それぞれの影響の程度を判別できる有意な差はみられなかった。ただし、トンネル区間であるNo.6,7,9,10の予測誤差 σ_{Δ} は、総じて明かり区間よりも小さい。これは、トンネル内では主として列車の走行でレール頭頂面凹凸が進展するが、明かり区間では降雨や日照などの環境影響を受けるためと考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 12通りの解析条件毎に、軸箱加速度を用いたレール頭頂面凹凸の経時変化予測モデルを、通トンの指数関数として求めた。
- (2) (1)で求めた予測式の回帰係数から、構造物の種類、軌道構造、線路線形等の条件については個々に差は見られるものの、それぞれの影響の程度を判別できる有意な差はみられなかった。

参考文献

- 1) 永沼泰州：東海道新幹線における短波長管理と凹凸データの活用，日本鉄道施設協会誌，Vol.38，No.6，pp.49-52，2000。
- 2) 福山幹康，田中博文，古川敦：軸箱上下加速度を用いたレール頭頂面凹凸経時変化の実態調査，第14回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2007)，pp.623-624，2007。
- 3) 福山幹康，田中博文，古川敦：騒音低減を目的としたレール削正箇所選定のためのレール凹凸評価指標の提案，第14回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2008)，pp.267-270，2008。