

レール凹凸評価指標と削正車最適運用計画策定システム

田中 博文* 福山 幹康** 三和 雅史*

Proposal of Evaluation Index for Rail Roughness and Planning System for Optimum Operation of Rail Grinding Car

Hirofumi TANAKA Motoyasu FUKUYAMA Masashi MIWA

In this study, we analyzed an index that was able to evaluate the rolling noise excited by the rail roughness, based on the vertical axle-box acceleration. From the result of the analysis, we found that standard deviation of the vertical axle-box acceleration of 100m lot, which processed by band-pass filter of 500-800Hz, has a high correlation with the rolling noise. Accordingly, we proposed this standard deviation as a rail roughness evaluation index to be used for establishing the rolling noise measures. Furthermore, using this evaluation index, we developed an optimum operation planning system for rail grinding car, through improving the existing MMT planning system. The developed system can take into consideration both the measure for the rolling noise and that for the rail shelling.

キーワード：レール凹凸，レール削正，最適運用計画策定システム，軸箱上下振動加速度，転動音

1. はじめに

新幹線におけるレール削正車の運用は、シェリング対策の観点から累積通トン管理で行われることが多い¹⁾。一方で、レール削正によって、レール頭頂面の凹凸（以下、「レール凹凸」という。）を除去し、転動音を低下することによって、沿線騒音が低下する効果もあることが知られている^{2), 3)}。しかし、転動音、あるいは沿線騒音とレール凹凸との関係は明確ではなく、それを表す適切かつ簡易な評価指標は存在しない。したがって、具体的なレール削正車の運用計画は、計画作成担当者の経験に頼るところが多く、必ずしも一定の基準に基づいた適切かつ効率的なものとはなっていない。

これらの背景に対して、本研究では、まず、レール凹凸に起因する転動音に着目し、比較的容易に測定可能な軸箱上下振動加速度（以下、「軸箱加速度」という。）を用いて、沿線騒音を適切に評価しうる指標を検討した。次に、過去に軌道変位の最適保守のために開発したマルチ最適運用計画策定システム^{4), 5)}を応用し、レール凹凸の経時変化に伴う沿線騒音対策および累積通トン管理の観点からのシェリング対策の両方を考慮した、レール削正車最適運用計画策定システムを検討した。

2. レール削正前後の沿線騒音および軸箱加速度

2.1 沿線騒音および軸箱加速度測定の概要

レール凹凸が転動音に与える影響を評価するため、レール削正前後で、沿線騒音および軸箱加速度の測定を行った。レール削正は、高架橋上のスラブ軌道区間において、16頭式削正車で8パス行った。

沿線騒音測定は、レール削正を実施した区間の中央付近で実施した。測定点は、高架橋の軌道中心より25m離れた地点の地表面から1.2mの高さとし、周波数補正回路はA特性、時間重み特性は遅い動特性(SLOW)を用いた。

軸箱加速度は、新幹線電車で時間サンプリングで測定し、レール削正を実施した区間について処理を行った。なお、試験区間は駅の近傍であり、通過列車と停車列車の間で走行速度の差が大きく、通過列車で平均230km/h、停車列車で平均130km/h程度であった。

2.2 レール削正前後の沿線騒音

図1に、レール削正前後の騒音レベルを示す。130km/h付近のプロットは停車列車、230km/h付近のプロットは通過列車の騒音レベルである。レール削正後に、通過列車では2dB程度、停車列車では3dB程度、騒音レベルが低下している。なお、走行速度が高い方がレール削正による騒音レベルの低下量が小さい理由は、騒音レベルに占める転動音の割合が小さいためである。

図2に、レール削正前後の沿線騒音の1/3オクターブバンドスペクトルを示す。通過列車では、80Hz付近と

* 軌道技術研究部（軌道管理）

** 前 軌道技術研究部（九州旅客鉄道株式会社）

特集：軌道技術

800Hz付近を中心とする帯域にピークが見られ、レール削正後に80Hz付近で2～3dB、800Hz付近で5dB程度低下している。停車列車でも同様に2つのピークが見られるが、80Hz付近のピークは通過列車ほどは顕著ではない。レール削正後には、80Hz付近のピークで5dB程度、800Hz付近のピークでは最大15dB程度低下している。

80Hz付近のピークは、構造物音に起因するピークであり、走行速度の速い通過列車の方が加振力が強いためにパワーが大きくなっている。一方、800Hz付近のピークは、転動音に起因するピークである⁶⁾。なお、停車列

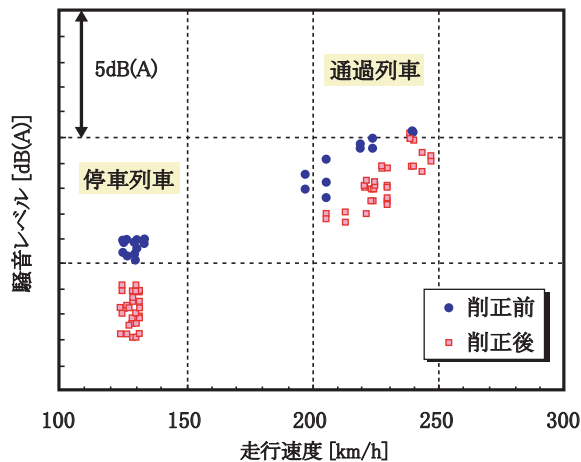
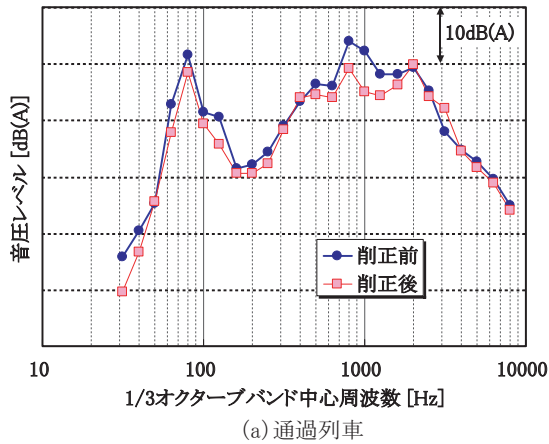
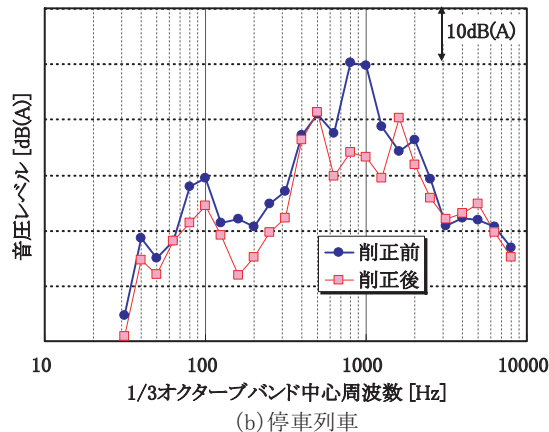


図1 レール削正前後の騒音レベル



(a) 通過列車



(b) 停車列車

図2 沿線騒音の1/3オクターブバンドスペクトルの例

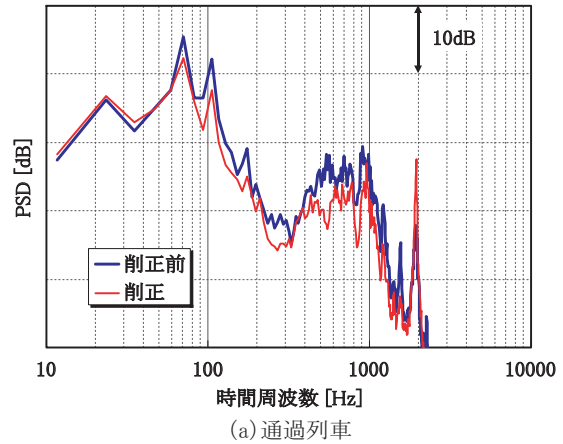
車の方がパワーの低下量大きいのは、沿線騒音に占める転動音の寄与度が相対的に大きいことを意味している。

2.3 レール削正前後の軸箱加速度

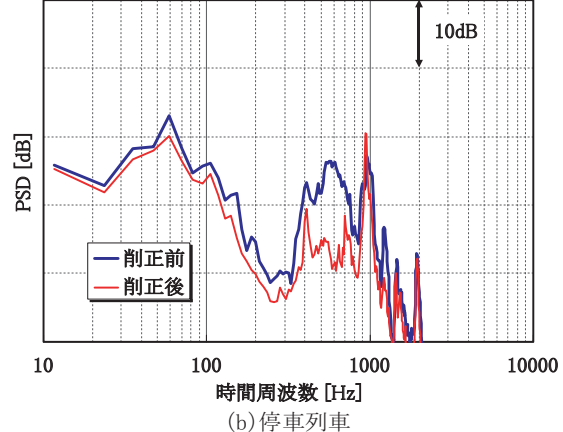
図3に、レール削正前後の軸箱加速度のパワースペクトル密度 (PSD) を示す。通過列車では70Hz、停車列車では60Hz付近に最大のピークが見られる。このピークは、台車のばね下質量と軌道間の固有振動に起因するものであり、レール削正後に2～3dB程度低下している。また、通過列車で500～1500Hz付近、停車列車で400～1200Hz付近の帯域にもピークが見られる。このピークは、レール削正後に通過列車で5～10dB程度、停車列車では10～15dB程度低下している。この帯域は、沿線騒音のスペクトルにおいて、レール削正後にパワー低下していた帯域と概ね一致しており、レール削正によってレール凹凸が除去された結果を検出していると考えられる。

2.4 レール削正による凹凸の除去

レール削正車には、31mm-300mmの偏心矢による凹凸測定装置が搭載されており、今回はその凹凸測定結果をデータレコーダーで収録し、周波数分析を行った。なお、車上の凹凸測定装置では、短波長(30～300mm)、中波長(300～1000mm)および長波長(1000～3000mm)



(a) 通過列車



(b) 停車列車

図3 軸箱加速度のパワースペクトルの例

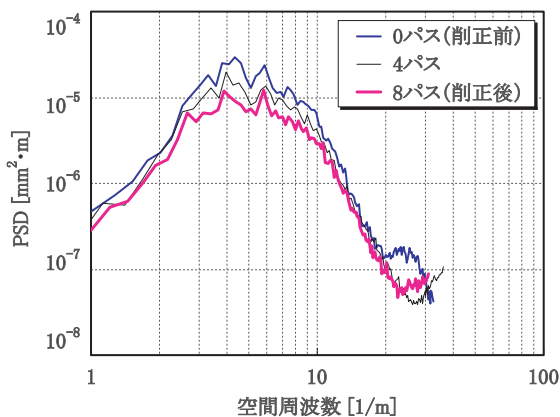


図4 レール凹凸のスペクトルの例

の凹凸が測定可能である。

図4に、短波長のレール凹凸のパワースペクトルを示す。ここで、レール削正前後で変化が見られたのは短波長のみであった。図4より、レール削正のパス数が増加するにつれて、空間周波数4～6[1/m]程度を中心とする周波数帯域でパワーが次第に低下していることがわかる。

軸箱加速度のスペクトルでパワーが大きく低下した周波数帯域を測定列車の走行速度を考慮して波長に換算すると30～130mm程度となり、レール削正によって短波長のレール凹凸が改善された結果を軸箱加速度が検出していると考えられる。沿線騒音のスペクトルで低下した800Hz付近の周波数帯域は、転動音に起因する周波数帯域とされており、また、軸箱加速度で低下した周波数帯域とも概ね一致していることから、レール削正によってレール凹凸が改善された結果を反映していると考えられる。

また一般的に、レール削正車によって除去可能なレール凹凸の波長は、今回実施したアンブロック制御の場合、砥石の直径に相当する180mm以下とされており⁷⁾、図4の凹凸測定結果と概ね一致していることがわかる。

3. 転動音を考慮したレール凹凸評価指標

3.1 転動音を考慮したレール凹凸評価指標の導出

新幹線の沿線騒音を評価する手法は、過去に幾つかの手法が提案されている⁸⁾。しかしながら、区間によって変化し、転動音に大きく寄与すると考えられるレール凹凸の影響を考慮した沿線騒音の評価手法は存在していない。

前章の沿線騒音および軸箱加速度の周波数分析結果から、レール削正前後にパワーが変化した周波数帯域がレール凹凸状態に影響を受けていると考え、本章では転動音と強い関係のある短波長のレール凹凸評価指標について検討する。ここで、検討するレール凹凸評価指標は、レール削正車の投入目安となることを前提としているため、レール削正によって直接的に転動音としての改善が見込まれる500～1500Hz付近の周波数帯域に着目して、

レール凹凸評価指標の導出を行った。

軸箱加速度を用いて、転動音を考慮したレール凹凸評価指標を導出するために、軸箱加速度のパワースペクトルのピーク近傍の標準偏差を独立変数、沿線騒音の1/3オクターブバンドスペクトルのピーク近傍の音圧レベルを従属変数とする回帰分析を行った。ピーク付近を抽出するバンドパスフィルタ（以下、「BPF」という。）の周波数帯域を試行錯誤的に変化させながら、最も両者の相関係数が高くなる周波数帯域を検討した結果、転動音を考慮したレール凹凸評価指標として式(1)を得た。

$$R = 16.4 \times \log(\sigma_{aV}) \quad (1)$$

ここで、 R ：転動音を考慮したレール凹凸評価指標

σ_{aV} ：500～800HzでBPF処理した軸箱加速度の100mロット標準偏差

なお、新幹線におけるレール削正車の一日の施工延長が数百m程度であることから、レール凹凸評価指標には軸箱加速度の標準偏差は、100mロット値を用いることとした。

このレール凹凸評価指標を用いることによって、同じ累積通トンであっても、レール凹凸状態が悪く、転動音が大きい区間から、優先的にレール削正を実施できるので、沿線騒音環境の観点から効率的なレール削正の実施が可能になると考えられる。

3.2 レール凹凸評価指標の試算例

図5に、測定時期が2ヶ月異なる軸箱加速度データを用いて、レール凹凸評価指標を試算した結果を示す。なお、当該区間の新幹線電車の走行速度はいずれも260km/hである。この2回の測定間に(⇄印)で示す区間でレール削正が行われており、削正後にレール凹凸評価指標が大きく低下しているのが確認できる。

なお、この評価指標は軸箱加速度データを用いて算出

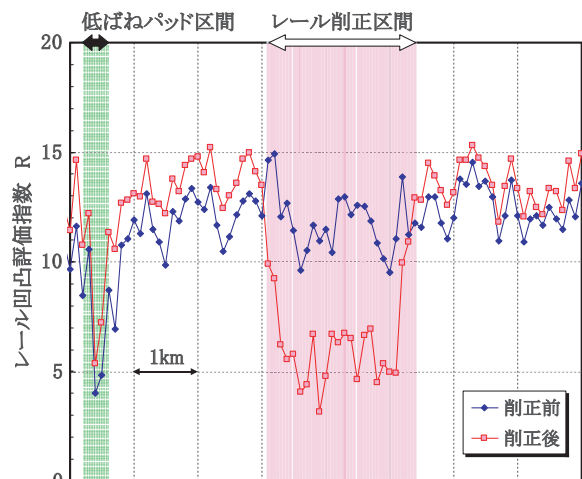


図5 レール凹凸評価指標の試算例

特集：軌道技術

することから、測定列車の走行速度の影響を大きく受ける。そのため、この評価指標を算出する際には線区の最速列車で測定された軸箱加速度データを用いるのが望ましい。また、現時点では明確なしきい値を設定していないため、評価指標が相対的に大きな区間をレール削正することで、効果的にレール凹凸に起因する沿線騒音を低下させることが可能となる。

加えて、軸箱加速度は輪重変動を間接的に捉らえている⁹⁾ことから、軌道の剛性（支持ばね係数）の影響を大きく受ける。図5においても、低ばね係数の軌道パッドを敷設している区間（⇄印）では、レール凹凸評価指標が小さくなっていることがわかる。さらに、バラスト軌道区間では、スラブ軌道区間に比べて、軌道支持ばね係数が大幅に小さいため、同じレール凹凸状態であっても、輪重変動および軸箱加速度の標準偏差が小さくなり、レール凹凸評価指標も小さくなる傾向にある。したがって、今回提案した指標を用いてレール削正を実施する際には、軌道構造の違いに注意する必要がある。また、相対的にバラスト軌道に比べてスラブ軌道の評価指標が大きくなることから、スラブ軌道区間のレール削正を優先的に行い、線区としての転動音を低下させるといった活用方法も考えられる。

3.3 レベル化処理による短波長レール凹凸の評価

上記の手法によって、軸箱加速度から短波長のレール凹凸を評価しようとする場合、サンプリング間隔が短いので、データ容量が膨大となる。参考までに、260km/hで走行している新幹線電車で測定された軸箱加速度を、式(1)で示した500～800HzでBPF処理した軸箱加速度をエイリアジングしないように距離化するためには、式(2)で示される間隔以下でサンプリングする必要があるため、3cm以下で距離サンプリングを行う必要がある。

$$\lambda = \frac{1}{f_{\max}} \times \frac{V}{3.6} \times \frac{1}{\alpha} \quad (2)$$

ここで、 λ ：サンプリング間隔 [m]
 f_{\max} ：分析対象波形の最大周波数成分 [Hz]
 V ：分析対象列車の走行速度 [km/h]
 α ：アンチエイリアジングのための係数
 ($\alpha = 2.5 \sim 5$ 程度)

そこで、BPF処理した軸箱加速度を直接距離化するのではなく、レベル化処理したのちに距離化すればデータ容量を圧縮でき、効率的な処理が可能になると考えられる。時系列データのレベル化処理は、式(3)によって行える。ここで、 τ は時間重み付けのための時定数であり、FAST ($\tau=0.125\text{sec}$)、SLOW ($\tau=1.0\text{sec}$) および VL ($\tau=0.63\text{sec}$) が一般的に用いられることが多く、時定数が

短いほど、平均化時間が短くなるので、高周波の衝撃的な振動を把握しやすくなる。

$$L(t) = 10 \log_{10} \left\{ \left[\frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^t a^2(\xi) e^{-(t-\xi)/\tau} d\xi \right] / \alpha_0^2 \right\} \quad (3)$$

ここで、 $L(t)$ ：観測時刻における時間重み付きレベル [dB]

τ ：時間重み付けのための時定数
 ξ ： $-\infty$ で表すある過去の時刻から観測時刻 t までの積分変数
 $a(\xi)$ ：時刻 ξ における加速度
 α_0 ：レベル化のための基準値
 ($\alpha_0 = 10^{-5} [\text{m/s}^2]$)

時定数 $\tau=0.125\text{sec}$ とした場合のレベル化処理は、時定数の逆数、すなわち8Hzの移動平均処理を行っているのとはほぼ等価である。よって、式(2)の関係より、時間サンプリングのレベルデータを距離サンプリングに変換する際に、通常の軌道検測データと同様の0.25mでサンプリングしてもエイリアジングを起こさないことがわかり、レベル化処理が有効であると言える。

4. レール削正車最適運用計画策定システム

4.1 レール削正車最適運用計画策定システムの概要

シェリング対策およびレール凹凸管理のために用いられるレール削正車を効率的に運用するためには、レール凹凸の状態および経時変化を踏まえて、必要な時期に、必要な区間を削正するように配慮する必要がある。ここで、シェリング対策は累積通トン管理で行われるので、一定の基準に基づいて容易に削正対象箇所を選定できるが、レール凹凸については効率的かつ適切な把握手法が存在しなかった。これらの観点から、レール削正車の運用計画は担当者による手作業で作成されることが一般的であり、作成された計画の妥当性が不明であると共に、計画作成に多くの手間を要していた。

一方、軌道変位を保守するために用いられるマルチプルタイタンパ（以下、「マルタイ」という。）については、その運用計画作成のための支援システムが既に開発されている^{4), 5)}。したがって、将来的な保守用車全体の運用計画作成システムへの拡張を考慮した場合、レール削正車最適運用計画策定システム（以下、「レール削正車運用システム」という。）の構築にあたっては、このマルタイ最適運用計画策定システム（以下、「マルタイ運用システム」という。）を応用するのが都合が良い。したがって本研究では、マルタイ運用システムを改良し、レール削正車運用システムを開発する。

ここで、マルタイ運用システムは1台のマルタイにつ

いて各種制約条件を設定し、その運用計画を作成するものである。レール削正車運用システムも同様に1台のレール削正車について制約条件を設定し運用計画を作成するものであり、システムの構築に当たってはほぼマルチ運用システムを転用可能である。しかし、レール削正車の運用では、シェリング対策として、レール凹凸にかかわらず前回のレール削正からの累積通トンが上限値を超えないよう運用計画を立てる必要がある。このため、レール削正車運用システムではマルチ運用システムに対し、累積通トンという制約条件が増えることになる。

なお、マルチ運用システムでは軌道変位進みを推定し、期末における軌道変位が小さくなるように運用計画を作成するが、レール削正車運用システムでは軌道変位ではなく前章で提案したレール凹凸評価指標が小さくなるように運用計画を作成することとなる。

4.2 レール削正車運用計画モデル

ここでは、マルチ運用システムのために既に構築されているマルチ運用計画モデル(以下、「マルチモデル」という。)^{4), 5)}を改良することでレール削正車運用計画モデル(以下、「削正車モデル」という。)を構築する。マルチモデルは、マルチによる軌道変位保守計画(半年～1年程度)を作成するための数理計画モデルである。このモデルを解くことで、与えられた制約条件もとで最良の軌道状態を維持するための軌道変位保守計画が作成できる。ここでは、マルチモデルに制約条件を追加、変更し、目的関数の変更等の改良を行い、削正車モデルを構築する。

レール削正車の運用計画では、レール凹凸状態を把握した上で、レール削正による改善効果が高い区間を選定するのがよい。そこで、レール削正車運用の1回の作業延長を考慮して、作業単位区間を有効に選定する「削正箇所選定モデル」を構築する。そして、「運用計画作成モデル」により計画作成上の制約を考慮しながら、選定した区間への施工時期とレール削正車の運用をスケジューリングする。

また、本モデルでは、マルチモデルと同様に、計画対象線区を図6に示すロット、ブロックという計画・管理単位に分割して、レール凹凸評価指標の推移予測、前回のレール削正からの累積通トンの予測と削正時期を検討する。

ロットは、レール凹凸状態管理単位であり、レール凹凸状態、軌道構造、構造物の有無などの管理単位は100mとする。レール凹凸評価指標については、ロットごとに算定する。なお、分岐器介在区間や伸縮継目等、レール削正が不可能な区間は、管理対象には含めない。ブロックは、連続するN個のロットの集合(N×100m)から成る削正作業単位であり、レール削正箇所選定における

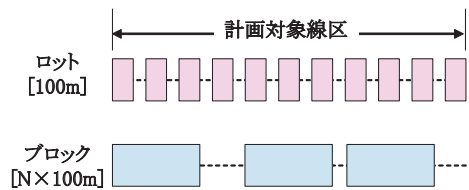


図6 線区の計画・管理単位

基本単位とする。Nの値については、各線区の実態を考慮してブロックの長さが1日あたりの削正延長と等しくなるように設定する。レール削正車モデルにより出力される削正箇所はブロック単位とし、出力されたブロックに含まれる全ての計画対象ロットを削正する。すなわち、本モデルはロットを適切に組み合わせてブロックを作成するものである。

4.3 レール削正車最適運用計画策定システム

レール削正車運用システムは、前節までに構築した計画モデルに基づいた削正計画を容易に作成するためのものである。

図7に、本システムの構成を示す。マルチ運用システムでは、軌道変位のロット標準偏差等を軌道状態の評価指標として用いるが、レール削正車運用システムでは、3章で提案したように軸箱加速度から算出したレール凹凸評価指標を用いることとなる。したがって、図7①では軸箱加速度を入力データとして用いる。合わせて、運用計画にあたって必要となる保守基地のレイアウト、使用制限期間等の制約条件を実情に応じて入力する。表1に、入力データの一覧を示す。入力データには、システムを運用するに当たって、初回のみデータ作成が必要なものと、計画を作成するときに随時更新が必要な

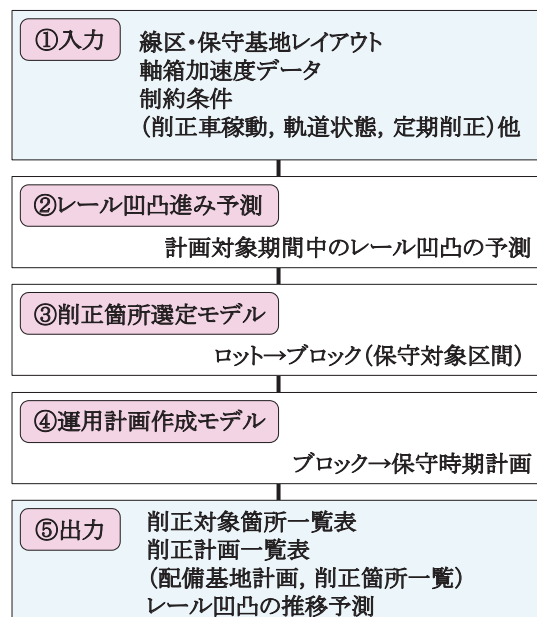


図7 レール削正車運用システムの構成

特集：軌道技術

表1 レール削正車運用システムの入力データ

条件	項目	データ作成	
		初回のみ	随時
計画条件	計画期間		○
	1日の削正作業延長	○	
制約条件	線区・基地のレイアウト	○	
	各保守基地の担当範囲	○	
	レール削正車回送可能範囲	○	
	レール凹凸評価指標（基準値，目標値）	○	
	各期の削正可能日数		○
	レール削正車配備基地（期指定 あるいは 期禁止）		○
	レール削正箇所（期指定 あるいは 期禁止）		○
レール凹凸評価指標	計画開始時のレール凹凸評価指標		○
	レール凹凸評価指標の進み量/期	○	
	レール削正によるレール凹凸評価指標の改善量	○	
累積通トン	前回削正時期		○
	通トン/期	○	

データの2種類が存在する。

次に、図7②では、計画対象期間（例えば、次年度1年間）のレール凹凸進みを予測する。レール凹凸進みについては現段階で信頼できる予測モデルは得られていないが、おおむね時間の指数関数で推定できることがわかっているため、ここではこれを用いる。

図7③では、計画対象期間末でのレール凹凸進み予測結果を用いて、選定された区間のレール凹凸状態の総和が最大となるように保守対象区間を選定する。その際シェリング対策として、前回のレール削正からの累積通トンがある上限値を越える区間を必ず選定するような条件設定も可能である。

図7④では、③で選定した保守対象区間の削正スケジュールを決定する。ここでは、(1) 与えられたレール削正車運用可能日数を最大限に用いて、期末のレール凹凸状態を最良にする、(2) 目標とするレール凹凸状態が実現できる範囲で、レール削正車の作業数量を最小化する、のいずれかの最適化問題を解き、保守対象区間に対する保守時期を決定する。

最後に、図7⑤で計算結果を出力する。出力データは、(1) 削正対象箇所一覧表、(2) 削正計画一覧表（配備基地計画、削正箇所一覧）、(3) レール凹凸評価指標の推移予測である。

4.4 レール削正車運用システムの活用方法

新幹線を対象として今回開発したレール削正車運用システムは、新幹線のみならず在来線のレール削正車の運用計画の策定にも適用可能である。在来線の場合、考慮すべきレール凹凸としては、累積通トンに伴うレール凹凸増加に加えて、急曲線の内軌等に発生する波状摩耗がある。波状摩耗は、その周期的な凹凸によって、非常に大きな転動音が発生し、レール削正の対象となっている。また、周期的な凹凸によって発生する輪重変動が、軌道変位の進みを早めたり、軌道部材の劣化にも影響を及ぼしたりすることが指摘されている。今回開発したシ

テムにおいて、凹凸評価指標として波状摩耗の凹凸を適切に評価する指標を検討し、在来線にも対応できるようにシステムの改良を進めていく予定である。

5. まとめ

本研究では、新幹線におけるレール削正前後の沿線騒音および軸箱加速度を分析し、転動音を考慮したレール凹凸評価指標の提案を行った。さらに、そのレール凹凸評価指標を用いて、効率的に転動音を低下させるためのレール削正車運用システムについて検討を行った。得られた結果は以下の通りである。

- (1) レール削正前後の沿線騒音と軸箱加速度の測定結果から、レール凹凸に起因する転動音の周波数に着目した、軸箱加速度を用いたレール凹凸評価指標について検討した。その結果、500～800Hzでバンドパスフィルタ処理した軸箱加速度の100mロット標準偏差が転動音との相関が高いことがわかった。したがって、これを転動音対策としてのレール凹凸評価指標とするのがよい。
- (2) 既開発のマルチ運用システムを応用し、(1)で提案したレール凹凸評価指標を用いて、沿線騒音およびシェリング対策の両方を考慮して、効率的なレール削正車の運用計画を作成するためのレール削正車運用システムを開発した。

文 献

- 1) 石田誠，阿部則次：レールシェリング予防削正効果に関する実験的研究，鉄道総研報告，Vol.9, No.12, pp.19-24, 1995
- 2) 椎名公一，須永陽一：転動音の立場から見たレール頭頂面凹凸の管理手法，鉄道総研報告，Vol.4, No.11, pp.9-16, 1990
- 3) 須永陽一，金尾稔：転動音に対するレール削正効果およびレール振動に関する実験的検討，鉄道総研報告，Vol.8, No.6, pp.31-36, 1994
- 4) 三和雅史，河西智司，石川達也，奥村陽一，東川恒也：数理計画モデルによる軌道狂い最適保守計画の作成，鉄道総研報告，Vol.17, No.2, pp.25-40, 2003
- 5) 三和雅史，河西智司：マルチ作業計画作成システム，JREA, Vo.46, No.7, pp.8-10, 2003
- 6) 北川敏樹：転動音の特性と軌道・車両に係わるパラメータの影響，鉄道総研報告，Vol.22, No.5, pp.23-28, 2008
- 7) 日本スベノ株式会社：スベノ社のレール削正技術，鉄道車両と技術，No.85, pp.14-20, 2003
- 8) 長倉清，善田康雄：新幹線沿線騒音予測手法，鉄道総研報告，Vol.14, No.9, pp.5-10, 2000
- 9) 須永陽一，内田雅夫：輪重変動の立場から見たレール頭頂面凹凸の管理手法，鉄道総研報告，Vol.6, No.11, pp.49-57, 1992