

レールおよび道床状態を考慮した軌道保守方法の 最適選択モデルの構築

三和 雅史* 木村 寛淳* 山中 雅司**

Optimal Track Maintenance Strategy Model Constructed by Considering Deterioration Level of both Rail and Ballast

Masashi MIWA Hiroatsu KIMURA Masashi YAMANAKA

Through appropriate maintenance work, railway track irregularities must be kept at a satisfactory level with the minimum maintenance cost for a long term. Therefore, we have developed an optimal decision making model for track maintenance strategy such as tamping, rail grinding, rail replacement and ballast replacement schedule by considering the degradation level of both rail and ballast. In order to determine the economical strategies, the model was developed from the result of statistical model analyses by considering both the influence of track material deterioration on the interval time for tamping work and the effect derived from track material maintenance. By using the model, we can obtain the optimal track maintenance strategy. The output of the model indicates the sections for which maintenance must be executed.

キーワード：軌道保守計画，軌道材料保守計画，状態診断，統計的分析，最適選択モデル

1. はじめに

バラスト軌道においては、列車の繰返し通過に伴って軌道面の不整（軌道変位）が成長するため、多くの鉄道事業者では、マルチプル・タイ・タンパー（MTT）という大型機械によりこれを保守している。しかしながら、MTTは高価な機械であるため、少ない台数で広いエリアを効率よく保守するには、適切な運用が必要である。そこで、これまでに筆者らは、軌道検測の履歴データに基づいて軌道変位推移を予測し、次年度の軌道変位保守計画を作成するための軌道変位保守計画モデルを構築した¹⁾。本モデルを活用した計画支援システムは、現在、一部のJRで実用化されている。

一方、列車の繰返し通過に伴うレール凹凸量の増加、道床の細粒化や土砂混入等により材料の劣化が進行する。こうした材料の劣化は、軌道（高低）変位進みの促進等をもたらすため、軌道変位保守が多頻度化していくことが想定される。材料劣化が軌道変位保守頻度に与える影響に関しては、文献2) や3) において材料劣化を考慮した軌道変位推移モデルが提案されており、モデルの精度向上や材料保守と軌道変位保守を含めた保守計画の長期的、総合的な適正化が課題である。

以上のことから、このような効率的な軌道保守の実現を支援するために、レール及び道床状態を考慮した軌道

保守方法の最適選択モデルを構築したので、以下に報告する。なお、本稿で扱う軌道変位は全て高低変位のことである。

2. 材料劣化が軌道変位保守に与える影響

図1に示すように、レールや道床が劣化すると、レール凹凸の増加に伴う輪重変動の増加、道床劣化に伴う単位荷重当たりの沈下量の増加と軌道変位保守効果の低下等の現象が生じるため、軌道変位保守が多頻度化していき、多くの軌道変位保守費用を要することとなる。図2はレール、道床交換の前後の軌道変位進み量の変化の例である。各保守により進み量が約半分となることから、これらの材料保守には軌道変位保守周期の延伸効果を期待できる。但し、一般に材料保守は軌道変位保守よりも

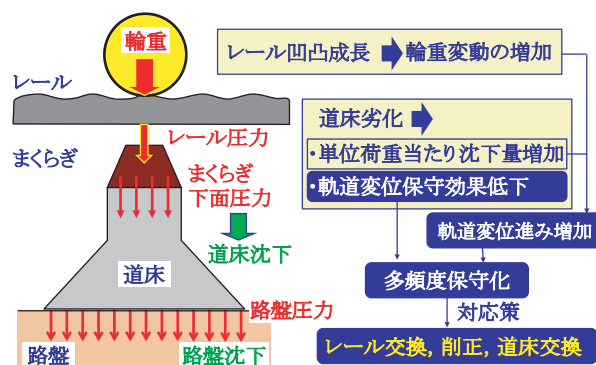


図1 材料劣化が軌道変位保守に与える影響

* 軌道技術研究部 軌道管理研究室

** 西日本旅客鉄道株式会社 大阪保線区

特集：軌道技術

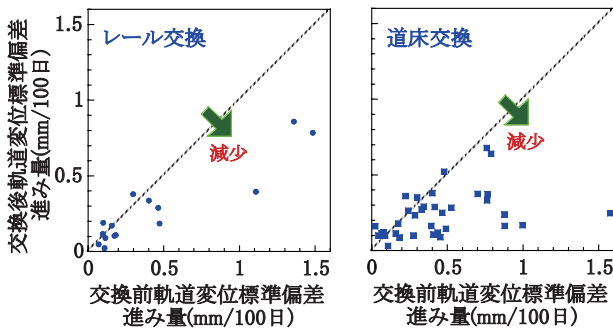


図2 材料保守による軌道変位進みの減少効果

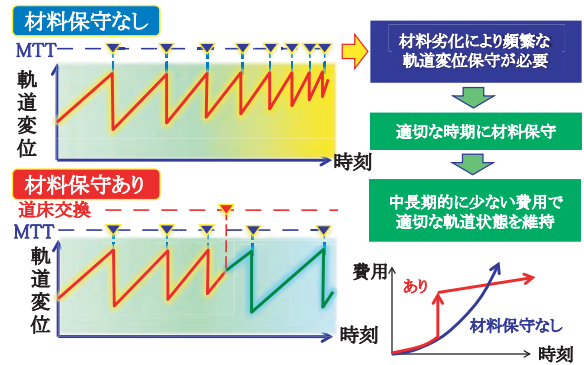


図3 長期的な経済性を考慮した保守

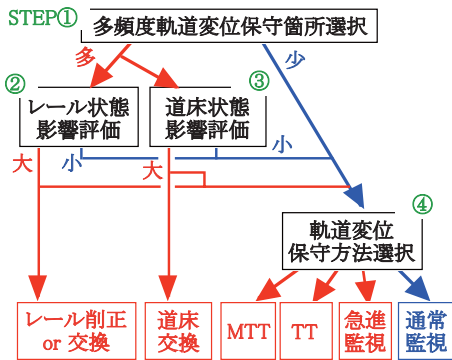


図4 軌道状態現状評価モデルの構成

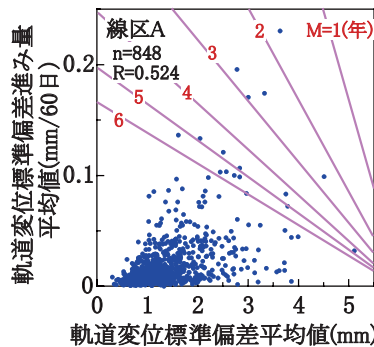


図5 軌道状態とM

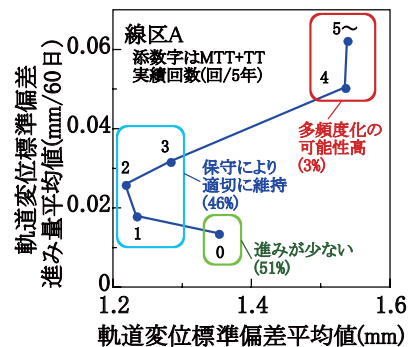


図6 保守頻度と軌道状態

多くの費用を要し、また材料の劣化速度は軌道変位進みに比べると遅いことから、図3に示すように材料状態や保守効果を検討した上で、適切な時期に材料を保守（加修）し、軌道変位保守費用を含む総保守費用を長期的に減らすという考え方が重要である。

3. 材料保守の検討箇所の選定

各箇所に対して現状を評価し、適切な保守方法を提案するモデルを構築する。本モデルでは、軌道変位や軸箱加速度（上下）、保守実績等の履歴データを用いて各箇所の現状を評価し、適切な保守方法を選択する。本モデルは図4に示す①～④のSTEPに分けられる。

STEP①では、軌道変位と保守実績データを用いて軌道変位保守の多頻度箇所を抽出する。

STEP②では、①で抽出した箇所のうち、レール状態の不良箇所をレール保守の検討箇所として抽出する。なお、一般にレールの保守時期は、敷設或いは削正後の通過トン数等に基づいて別に決められていることから、抽出する検討箇所については、既定の保守時期の前倒しや加修等を検討するのが現実的と考えられる。

STEP③では、①で抽出した箇所のうち、道床状態の不良箇所を道床交換の検討箇所として抽出する。

STEP④では、現在の軌道変位が大きい箇所についての軌道変位保守の方法や監視内容を提案する。

なお、以下に示す分析には特に断らない限りログ

レール軌道を主体とする線区A（在来線、高頻度輸送線区）のデータを用いる。また、軌道変位や進み、軌道変位保守の改善量等に影響すると考えられる無道床区間、踏切、EJ、IJ、分岐器のいずれも含まないロットにおける25mロット軌道変位データを用いる。

3.1 多頻度軌道変位保守箇所の抽出⁴⁾

3.1.1 軌道変位、進み、保守頻度間の関係

図5に軌道変位と進みの関係を示す。ここでは、約5年間の各検測時における値の平均値を用いた。この関係を保守頻度（MTT、TT回数）別の平均値により図6のように整理すると、保守実績のない51%のロットでは軌道変位進みが小さく、また適度に保守実績がある46%のロットでは軌道状態が適切に維持されているのに対し、保守量が比較的多い3%のロットでは軌道変位と進みが平均的に大きいことから、このような箇所では軌道変位保守が多頻度化している可能性が高い。

以上より、軌道変位保守の多頻度箇所には、軌道変位と進みの両方が定常的に大きく、また、保守実績が多い箇所が該当する。STEP①では、この条件に合う箇所を効率的に抽出する。

3.1.2 抽出指標の検討

次式のように、軌道変位（評価期間全体での平均値）と目安値との差を進み量（同）で除した値は、ランダムに選んだ時刻において軌道変位が目安値に到達するまでの平均的な猶予期間（Mean Time to Maintenance）を表し

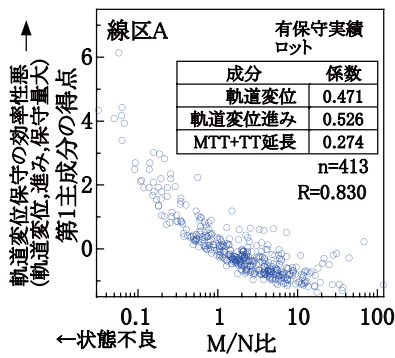


図7 M/N比と主成分得点

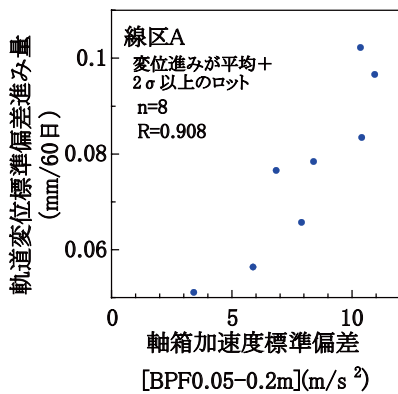


図8 軸箱加速度と軌道変位進み

ていると考えられる。ここではこの期間をMと表す。

$$M = \frac{\text{軌道変位目安値} - \text{平均軌道変位}}{\text{平均軌道変位進み}} \quad (1)$$

図5にはMが1～6(年)となる軌道変位、進みの組み合わせを紫線で示した(軌道変位の目安値:6mm)。ここで、このような軌道状態を実現するのに要した軌道変位保守量(MTT+TT延長)をN(km/評価期間)とすると、次式で表されるM/N比はOutput/Inputの関係にあり、軌道変位保守の効率性を表していると解釈できる。

$$M/N \text{比} = \frac{\text{評価期間中の軌道の品質(Output)}}{\text{評価期間中MTT,TT保守延長(Input)}} = \frac{M}{N} \quad (2)$$

つまり、このM/N比が小さな箇所では、材料保守を行わずに軌道変位保守を継続することは効率的でないと考えられる。よって、M/N比を多頻度軌道変位保守箇所の抽出指標とする。

ここで、M/N比を算出する一方で、軌道変位、進み、Nを変数として主成分分析を行って得られた第1主成分得点を算出した結果を図7に示す。図中に示す各成分の係数によれば、軌道変位、進み、Nが大きい場合に得点は高く、この値とM/N比の相関は高い。よって、M/N比は多頻度保守箇所の抽出指標として有効である。

さて、連続的な保守を基本とするMTT保守の性質上、状態が良くても近傍に不良状態の箇所があるために合わせて保守されてしまう箇所についても、M/N比は小さく算出される可能性が高い。よって、M/N比による抽出は、

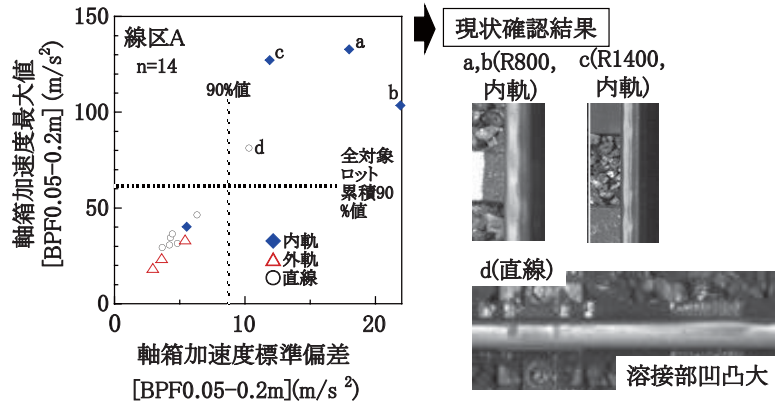


図9 軸箱加速度(レール)と現状確認結果

軌道変位が一定値以上の箇所に対して行うのが適当である。例えば線区Aでは保守の実態に基づいて、軌道変位標準偏差の平均値が約2mm以上の箇所に対して抽出を検討するのがよいと考えられる。

ところで、軌道変位進みには保守延長の情報が含まれているため、MとM/N比の相関は高い。また、一般に軌道変位データは検測の度に必ず得られるが、保守実績(延長、実施日)データは担当者による登録作業によるものであるため、後者のデータの方が精度は低い。よって、保守実績データの精度を保証できない場合には、M/N比とMを併用して多頻度保守箇所を抽出すればよい。

3.2 レール保守検討箇所の抽出⁵⁾

3.2.1 レール状態の影響評価

STEP②ではSTEP①で抽出されたロットから、レール状態が軌道変位保守の多頻度化へ大きく影響していると考えられる箇所を抽出する。

レール凹凸の評価には、凹凸量との相関が高いとされる軸箱加速度を用いる。ここでは、想定するレール凹凸の波長を考慮して、波長0.05～0.2mでBPF処理した値を用いる。この軸箱加速度について、軌道変位進み量が大きい箇所(進みの平均に標準偏差の2倍を加えた値以上の進みの箇所)における軌道変位進み量との関係を図8に示す。軸箱加速度の大きい箇所では軌道変位進み量が大きい傾向にある。

以上より、軸箱加速度が大きい多頻度保守箇所では、レール状態の劣化により軌道変位進み量が大きい可能性は高いと考えられる。

3.2.2 レール保守検討箇所の抽出

線区AにおいてMまたはM/N比の下位10箇所を多頻度軌道変位保守箇所として抽出すると、直線が7ロット、曲線内軌が4ロット、曲線外軌が3ロットの計14ロットが選ばれる。この箇所での軸箱加速度の標準偏差と最大値の関係を図9に示す。ここで、全ロットの軸箱加速度分布の90%値を超える4ロット(a～d)の状態を調査した。a, bは半径800m, cは1400mの曲線内軌であり、

特集：軌道技術

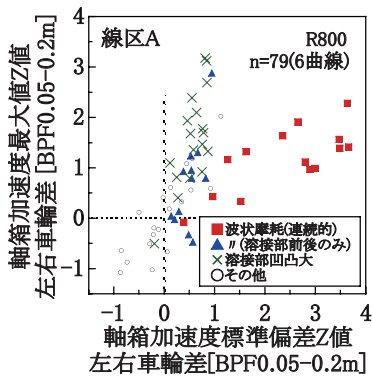


図10 軸箱加速度Z値左右差

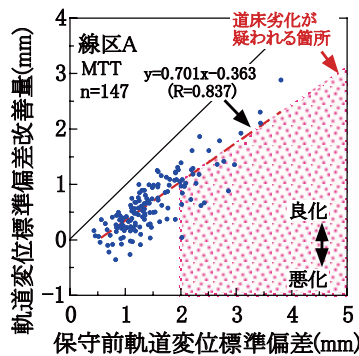


図11 軌道変位保守改善量

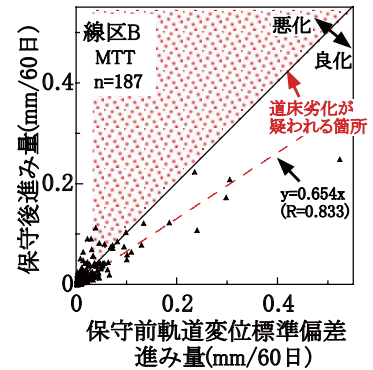


図12 MTT 保守前後の軌道変位進み

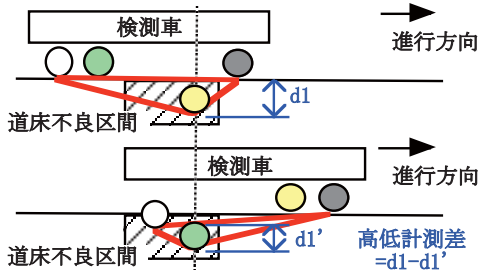


図13 高低検測差の概念

波長約0.2m、波高0.2～0.4mmのレール凹凸を有する波状摩耗が確認された。dは直線区間であり、溶接部で大きな凹凸が確認された。よって、これらの箇所ではレール状態が軌道変位進みの増大に影響している可能性が高いことから、レール保守の検討箇所として抽出する。

3.2.3 劣化内容の推定法

レール凹凸の様態には、波状摩耗や溶接部付近での凹凸、傷等が考えられる。ここで、左右車輪は輪軸として一体であるが、曲線内軌に波状摩耗が存在する箇所を輪軸が通過する際には内軌側車輪の軸箱加速度が連続的に大きくなるのに対し、傷や溶接部で大きなレール凹凸が存在する箇所では、これらの存在する側の車輪の軸箱加速度が局所的に大きくなると考えられる。そこで、軸箱加速度の左右車輪での差(左右差)によるレール状態の評価法を検討する。

ここでは、レール凹凸量と軸箱加速度の関係等が両車輪間で異なる場合を想定して、各車輪側の軸箱加速度(標準偏差、最大値)の平均値と標準偏差を用いてZ値($\frac{\text{測定値}-\text{平均値}}{\text{標準偏差}}$)を算出し、このZ値の左右差を評価に用いる。

線区Aにおいて、半径800mの左曲線における軸箱加速度の標準偏差と最大値の各Z値の左右差(左-右)を図10に示す。連続的な波状摩耗のある箇所では標準偏差の左右差が大きい傾向にある。一方、溶接部でのレール凹凸が大きい箇所やレール傷の存在箇所では最大値の左右差が大きい傾向にある。

以上のように、軸箱加速度によりレール凹凸の様態を推定することで、それに応じた保守方法を提案できる。

3.3 道床保守検討箇所の抽出⁶⁾

3.3.1 道床状態の影響評価

STEP③ではSTEP①で抽出されたロットから、道床状態が軌道変位保守の多頻度化へ大きく影響していると考えられる箇所を抽出する。道床状態については、以下に示す複数の指標により合わせて評価する。

(1) 軌道変位保守改善量による道床状態評価

全ロットのMTT保守前の軌道変位と改善量の関係を図11に示す。保守前の軌道変位が大きいと改善量も大きい傾向にある。特に、保守前の軌道変位が2mm以上の改善量データは全て正であるがばらついており、改善量が少ない箇所については道床劣化の影響が考えられる。そこで、多頻度保守箇所での改善量の実測値(保守前軌道変位が2mm以上の場合)が、図中の回帰直線によって得られる推定値より小さなロットを道床状態の不良が疑われる箇所として抽出する。

(2) 軌道変位保守前後の進み量による道床状態評価

軌道変位保守により軌道変位が小さくなると輪重変動が減少すると共に、道床が良好で十分に突き固められて安定するため、保守後の軌道変位進みは保守前より減少すると考えられる。そこで、線区Aと条件がほぼ同じ線区BにおけるMTT保守前後の軌道変位進みの例を図12に示す。平均的に保守後の進みは減少する傾向にあり、この傾向は保守前の進みが大きい箇所強い。そこで、進みが大きい箇所(進みの平均に標準偏差を加えた値以上の進みの箇所)のうち、保守後の進みが保守前より大きなロットを道床状態の不良が疑われる箇所として抽出する。

(3) 軌道支持ばね状態の変化による道床状態の評価

道床劣化による軌道支持ばね係数の変化箇所を2台車検測車で検測すると、図13に示すように軌道への輪重の作用状態が異なるために検測車の1-2-4軸と1-3-4軸で測定した高低変位の各検測値間に差(高低検測差)が生じる⁷⁾。軌道負担力の解析モデル(有限間隔弾性支持モデル⁸⁾)により、高低検測差が1mm以上となる条件を求めた結果は、以下のようであった。

- ・軌道支持ばね係数が小さい箇所が台車の固定軸距以

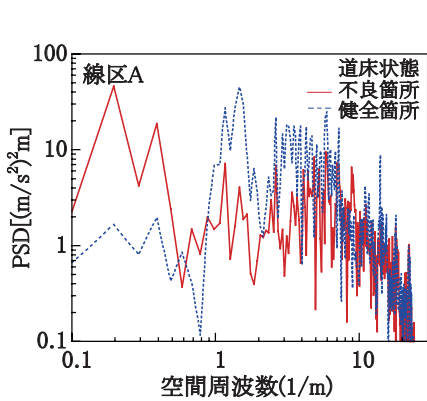


図 14 道床状態と軸箱加速度

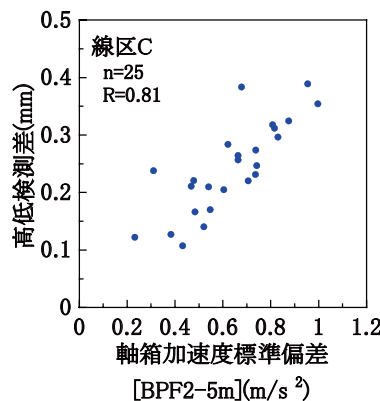


図 15 軸箱加速度と高低検測差

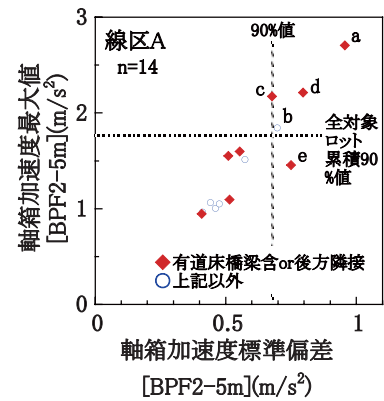


図 16 軸箱加速度（道床）

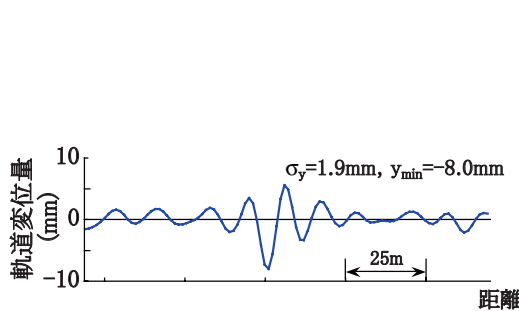


図 17 局所的に大きな軌道変位の例

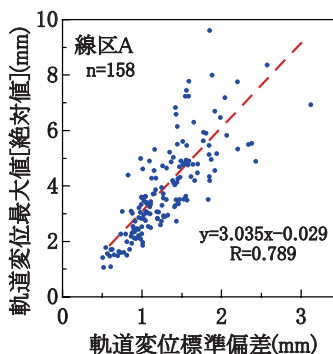


図 18 軌道変位標準偏差と最大値

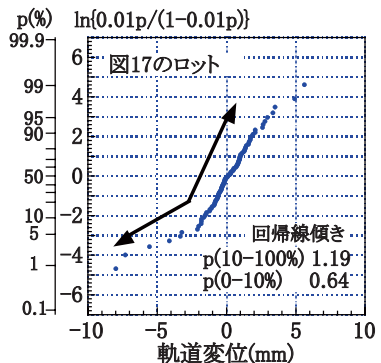


図 19 確率紙への打点

上の延長にわたって存在する。

- ・不良道床区間の軌道支持ばね係数は、健全道床区間に比べて 1/4 程度にまで小さい。
- ・軌道支持ばね係数がレール長手方向に対して短区間で大きく変化する。

この条件が道床不良により生じた場合には、本指標によって道床保守の検討箇所を選択できる。また、このような箇所では軸箱加速度も増加することが考えられる。道床交換の実績がある箇所（不良箇所と仮定）での交換前の軸箱加速度と近接した非交換箇所（健全箇所と仮定）における軸箱加速度のパワースペクトル密度 (PSD) を図 14 に示す。不良箇所では健全箇所に比べて空間周波数 0.2~0.4 (1/m) 付近の PSD が卓越している。よって、波長 2~5m の BPF で処理した軸箱加速度を道床劣化指標として用いる。この軸箱加速度と高低検測差については、別の線区ではあるが、図 15 のような関係が得られており、相関が高い。

線区 A において M 等に基づいて抽出した 14 ロットについて、軸箱加速度の標準偏差と最大値の関係を図 16 に示す。全ロットの軸箱加速度分布での 90% 値を 5 ロット (a~e) で超過する。これらは、先述の (1), (2) の各基準においても道床劣化の可能性が高いとして抽出した箇所である。各ロットの道床の表面状態を確認したところ、e では道床の細粒化が確認され、c で道床粒径が小さい一方、他については特に異常はなかった。よって、本

手法の精度に関しては、今後、道床内部の状態を確認して評価する必要がある。また、上記の各手法では道床状態を直接的には評価しないことから、実際の道床状態と良く符合する抽出法の検討が今後の課題である。

4. 軌道変位保守方法の選択

STEP ④では、STEP ①~③での評価に関わらず、軌道変位の大きさに応じて軌道変位保守の実施の有無と内容を全ロットに対して選択する。

4.1 MTT, TT 保守の選択

計画対象年度に軌道変位保守を行わないと年度末の軌道変位が大きくなると予想される箇所には、軌道変位保守を行う必要がある。1 章で述べた軌道変位保守計画モデルでも軌道変位の推移を予測して保守計画を作成するが、予測指標が軌道変位標準偏差であるため、この値が同じロットであっても、それが局所的な変位によるものか、連続的な変位によるものかは区別できない。例えば、図 17 に示すロットについては、軌道変位が局所的に大きいため、TT でも軌道状態を十分に改善できる可能性がある。ここで、軌道変位標準偏差と最大値の関係を図 18 に示す。なお、ここでは MTT 保守の延長単位を考慮して 100m ロットのデータを用いる。図から、最大値は標準偏差に対して平均的には約 3 倍であるが、先掲のよう

特集：軌道技術

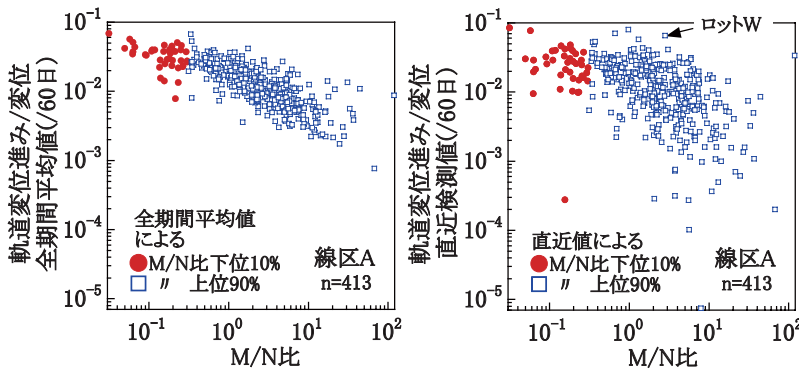


図20 M/N比と進み/変位比

な波形のロットではこれを大きく上回ることが分かる。
 また、このロットの軌道変位データをロジスティック確率紙に打点した結果を図19に示す。一般に、軌道変位は左右対称の分布形状を有するロジスティック分布への適合性が高いため、本紙に打点すると直線上に載るが、同図には折れ点が見れる。これは、このロットの一部分だけに局所的に大きな変位が存在するためである。よって、軌道変位の標準偏差と最大値の関係の他、ロジスティック確率紙上に軌道変位を打点した際の形状を評価することで、TT保守箇所を効率的に選択できる。

4.2 急進監視箇所の選択

M等の算出には軌道変位と進みに一定期間での平均値を用いるため、軌道変位進みの急激な増加(急進)箇所を抽出できない可能性が高い。そこで、急進監視箇所の選択法を検討する。

ここでは、急進の指標として軌道変位進み/変位比(進み/変位比)を用いる。この比の変動は、進みがほぼ一定であれば小さいが、急進箇所では増えると考えられる。線区Aにおいて平均値と直近値を各々用いて進み/変位比を算出し、M/N比との関係を図20に示す。平均値を用いた進み/変位比はM/N比との対応がよいが、直近値を用いた場合はばらつきが大きい。M/N比が下位10%には含まれないが直近の進み/変位比が大きなロットWの軌道変位推移を図21に示す。このロットでは軌道変位進みが最近になって増加する傾向にあることが分かる。

以上より、M/N比が小さくても進み/変位比が直近で急激に増加した箇所については、急進監視箇所として選択する。

5. まとめ

材料保守を含む軌道保守計画の適正化を支援するために、レール及び道床状態を考慮した軌道保守方法の最適

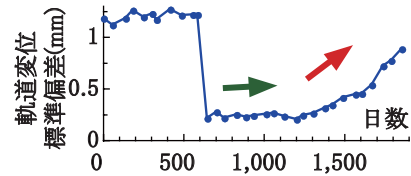


図21 ロットWの軌道変位推移

選択モデルを構築した。本モデルの精度や適用可能な範囲については、今後、更に検証を進める予定である。

なお、本モデルについては、軌道状態評価プログラムとしてソフトウェア化済みであり、今後何十年かの長期間におけるMTT保守、レール交換と削正、道床交換を対象とした保守計画を策定するための軌道保守長期計画策定支援システム⁹⁾の一部となるものであるが、単体でも動作する。

文献

- 1) 三和雅史, 河西智司: マルタイ作業計画作成システム, JREA, 第46巻, 7号, 2003
- 2) 池森昌幸: 軌道狂い状態の経時変化モデルとその応用, 土木学会論文集, 第365号/IV-4, 1986.1
- 3) 内田雅夫, 三和雅史: 材料劣化を考慮した軌道狂い経時変化の予測モデル, 鉄道総研報告, 第11巻, 第2号, 1997.2
- 4) 三和雅史, 木村寛淳, 山中雅司: 材料保守計画の適正化による効率的な軌道保守のあり方に関する検討(多頻度軌道変位保守箇所の抽出と軌道変位保守方法の選択モデル), 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集第4部, 2011.9
- 5) 山中雅司, 木村寛淳, 三和雅史: 材料保守計画の適正化による効率的な軌道保守のあり方に関する検討(軌道整正の多頻度化に与えるレール状態の影響評価), 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集第4部, 2011.9
- 6) 木村寛淳, 三和雅史, 山中雅司: 材料保守計画の適正化による効率的な軌道保守のあり方に関する検討(軌道整正の多頻度化に与える道床状態の影響評価), 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集第4部, 2011.9
- 7) 森本勝: 偏心矢測定による軌道状態の把握手法, 平成14年鉄道技術連合シンポジウム J-RAIL2002, 2002.11
- 8) 佐藤吉彦, 梅原利之: 線路工学, pp.6~8, 日本鉄道施設協会, 1987
- 9) 三和雅史: 軌道保守計画策定支援システムの開発, 第233回鉄道総研月例発表会講演要旨, 2010.4