

高頻度軌道検測データの軌道状態診断 および保守計画策定への活用方法

佐野 弘典* 三和 雅史** 山口 剛志***
吉田 尚史** 矢坂 健太# 坂口 和弘##

Developing an Efficient Method of Applying High-Frequency Measured Track Inspection Data to Diagnosis of Track Condition and Establishment of Optimal Track Maintenance Strategy

Kosuke SANO Masashi MIWA Tsuyoshi YAMAGUCHI
Takafumi YOSHIDA Kenta YASAKA Kazuhiro SAKAGUCHI

The acquisition of track inspection data measured at high-frequency enables us to predict future track conditions more precisely than ever before. On the other hand, a huge quantity of data must be appropriately processed to realize such prediction; therefore it is necessary to utilize the data effectively. In this paper, we analyzed the data and examined the data-processing method suitable for high-frequency measured track inspection data. Further, we focused on the seasonal variability phenomenon of track irregularity and examined the methods to detect the section showing such seasonal variation and to predict future condition of the section. Finally, we developed the track tamping scheduling system to which the high-frequency measured track irregularity data can be applied.

キーワード：高頻度検測，軌道変位，軸箱加速度，予測，状態診断，マルチ (MTT)

1. はじめに

営業車両に搭載した軌道検測装置を用いて軌道変位等を毎日、或いは数日に1程度の高頻度で測定し、軌道状態の予測、診断を高精度に行うためには、膨大な量の検測データの処理法や活用法を確立する必要がある。そこで、高頻度検測データに適した軌道変位進みの算定法や処理方法を検討した。また、軌道変位の季節変動に着目し、履歴データから変動箇所を選択して、将来の状態推移を予測する手法を検討した。更に、これらの検討結果に基づいて、高頻度検測データに対応した軌道変位保守計画支援システムを開発した。

本稿では、以上の結果について報告する。なお、本稿で扱う軌道変位とは、全て高低変位のことである。

2. 高頻度軌道検測データの処理・活用法

2.1 軌道変位進みの評価¹⁾

(1) 軌道変位進みの算定法

履歴データより軌道変位進み Δy を簡易に算定する式

- * 軌道技術研究部 軌道管理研究室
(現 九州旅客鉄道株式会社)
- ** 軌道技術研究部 軌道管理研究室
- *** 軌道技術研究部 軌道管理研究室
(現 東日本旅客鉄道株式会社)
- # 軌道技術研究部 軌道管理研究室
(現 西日本旅客鉄道株式会社)
- ## 九州旅客鉄道株式会社

の例として、式(1)が挙げられる。

$$\Delta y = (y_{t_2} - y_{t_1}) / (t_2 - t_1) \times 365 \text{ (mm/年)} \quad (1)$$

y_{t_1} , y_{t_2} : 軌道検測日 t_1 , t_2 における軌道変位

本算定法は、ある程度長い間隔で検測される条件下では、軌道変位データに漸増傾向が明確に現れるため問題はないが、短い間隔で検測が行われる場合には、現実的ではない軌道変位進みを示すことがある。これは、軌道形状を一定距離のサンプリングで検測する際、毎回同じ地点を測定するとは限らない等の理由により、短期間であっても連続して検測した値の間に差異が生じることがあるためである。

例として、新幹線軌道において約2年間(全188回)にわたって取得された高頻度検測データに対し、本式を適用して算出した10m弦軌道変位標準偏差(25mロット)の進み量の分布と統計量を図1、表1に示す。進み量の最大値は97mm/100日であり、また3mm/100日を超えるデータが多い。これらの中には、軌道変位の急進箇所が含まれる可能性はあるが、本データの分析期間後に、実際に急進したという実績はない。よって、次年度保守計画の策定時のように、ある程度の長期間における軌道変位進みの傾向を評価する場合には、推移を平滑化して評価すべきである。

そこで、連続8回検測分(約1ヶ月)の値の平均値を算出し、これに式(1)を当てはめて軌道変位進みを算出した結果と式(1)により得られた進み量を連続8回検測分平均して各検測時の進み量を算出した結果を先掲の表1に示す。いずれの方法によっても、著大な進み量が算

特集：軌道技術

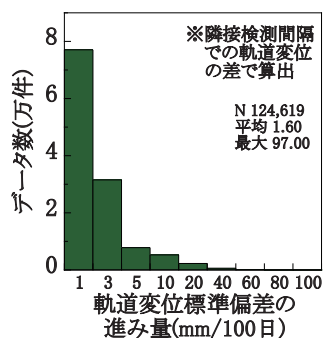


図1 軌道変位進みの頻度分布

表1 軌道変位進みの統計量

処理法	隣接検測間変位差	8回検測変位平均差	検測変位差8回平均	指数平滑法			
				平滑化係数	平均	95%値	99%値
平滑化係数				0.3	0.1	0.05	0.03
平均	1.60	0.25	1.36	0.18	0.05	0.03	0.02
95%値	6.10	0.93	4.36	0.58	0.20	0.12	0.07
99%値	15.50	2.14	8.55	1.22	0.43	0.23	0.14
99.9%値	33.76	4.65	16.00	3.02	0.95	0.53	0.33
最大値	97.00	14.63	29.23	9.83	1.66	0.82	0.59
標準偏差	3.08	0.44	1.66	0.27	0.09	0.05	0.03

(mm/100日)

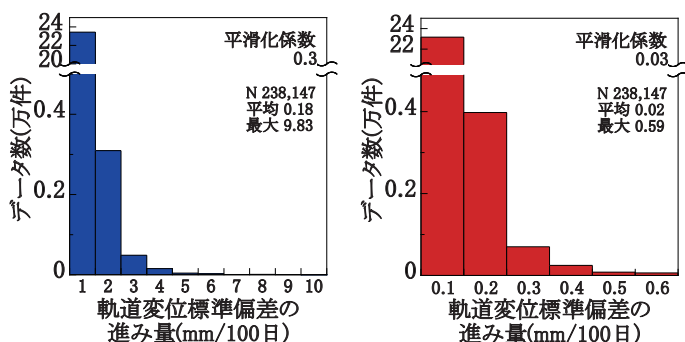


図2 指数平滑法による軌道変位進みの頻度分布

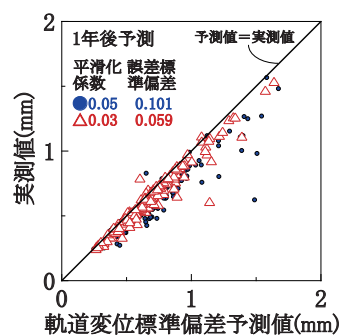


図3 軌道変位の予測値と実測値

出され、問題の解消には至らない。よって、これまでにMTT保守計画システム²⁾等で活用されてきた指数平滑法を適用したスムージング法を検討する。

本手法は過去のデータに重みを付けた線形加重和により予測するものであり、平滑化係数 s ($0 < s \leq 1$)は直近の検測値に対する重みである。よって、この値が小さい程、過去のデータを多く考慮した予測になる。従来頻度の検測データに適用する際には0.3～0.4程度が適当とされているが、高頻度検測データの場合には、考慮する履歴データ数を多くする必要が考えられる。そこで、 s を0.3とした場合の他、0.1、0.05、0.03の場合において得られた進み量の分布と統計量を図2(0.3、0.03の場合)と先掲の表1に示す。

平滑化係数を0.3とした場合、最大で10mm/100日程度の進み量となり、現実的な進み量ではない。0.1の場合には0.95mm/100日以下に全データの99.9%以上が含まれるが、最大値はなお大きい。一方、0.05と0.03の場合には、最大値は1mm/100日以下であり、軌道状態が極めて良好な新幹線軌道のデータの過去の分析結果³⁾等を考慮すると、実状に近い値と考えられる。

以上のことから、高頻度検測データを用いて軌道変位進みを算定する際には、平滑化係数を0.05や0.03として指数平滑法を用いるのが適当と考えられる。なお、履歴データを十分に蓄積できるのであれば、箇所別に適正值を設定するのが、更に望ましい。

(2) 処理に必要なデータ数、期間に関する検討

平滑化係数を0.05、0.03とし、バラスト軌道区間における1年分の検測データを用いて1年後の軌道変位を

予測した結果と実測値との比較を図3に示す。平滑化係数を0.03とした方が0.05の場合より予測精度は高く、97%の確率で±0.16mm以下の誤差であった。よって、以後の分析では平滑化係数に0.03を用いる。

さて、以上の予測精度は、上記のように1年分の履歴データを全て使って実現できるが、高頻度検測データの場合、データ数が多いのに加えてロット数も多いとデータ量が膨大になる可能性があり、処理に長時間を要すると思われる。そこで、履歴データとして用いる期間とデータ間隔の適正值を検討する。

まず、履歴データとして用いる期間を1ヶ月、3ヶ月、半年、1年とし、その間の全データを使って1年後の軌道変位を予測した際の誤差(予測値-実測値)の平均値、標準偏差を表2に示す。半年の場合には、1年分の履歴データを用いた際の統計量に近いことから、長期的傾向を把握するには、半年以上のデータを用いるのが適当と考えられる。

次に、上記の結果を考慮して、予測に用いる履歴データを半年とした場合に使用する履歴データの期間を週、半月、1、2ヶ月毎として算出した1年後の軌道変位の予測誤差を表3に示す。半年分の全データを使って予測した際の精度(誤差の標準偏差)に近いのは半月以下の場合である。よって、半月以下の間隔のデータを用いるのが適当と考えられる。

2.2 軌道変位の特異な変動や急進に関する検討

(1) 桁構造の挙動等が軌道変位へ及ぼす影響

天気や気温の変化が構造物の伸縮等に影響する場合、

表2 履歴データ期間と予測誤差

履歴データ	1ヶ月	3ヶ月	半年	1年
平均	0.009	0.047	0.044	0.045
最小値	-0.511	-0.486	-0.263	-0.261
10%値	-0.019	-0.004	-0.006	0.001
20%値	-0.007	0.009	0.009	0.012
最大値	0.161	0.440	0.437	0.531
標準偏差	0.052	0.077	0.063	0.063

(mm)

表3 履歴データ間隔と予測誤差

間隔	全	週毎	半月毎	1ヶ月毎	2ヶ月毎
平均	0.044	0.000	-0.004	-0.008	-0.010
最小値	-0.263	-0.376	-0.490	-0.545	-0.577
10%値	-0.006	-0.044	-0.055	-0.066	-0.070
20%値	0.009	-0.024	-0.033	-0.041	-0.045
最大値	0.437	0.137	0.453	0.501	0.523
標準偏差	0.063	0.052	0.067	0.073	0.077

(mm)

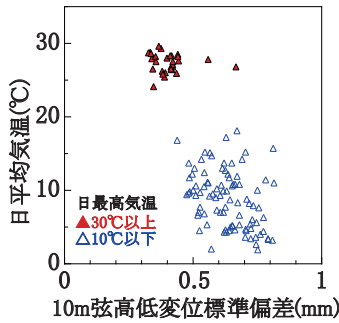


図4 日平均気温と軌道変位

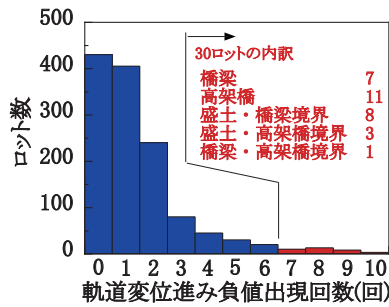


図5 負の軌道変位進みの出現回数

高頻度検出データに、この影響が現れる可能性がある。図4に、PCT桁を有する橋梁における日平均気温と高低変位の関係の例を示す。ここでは、温度変化による影響を明確にするため、日最高気温が30℃以上、10℃以下の条件に該当する検出データを用いた。本橋梁では、気温と軌道変位との間に相関があることから、軌道変位は季節的に変動している可能性が高い。

以上のように、高頻度検出データについては、上記のような軌道変位の変動が明確に現れる可能性がある。(2) 季節変動箇所の選択法と予測モデル⁴⁾

従来のように軌道変位が漸進的に増加することを前提としたモデルでは、軌道変位が気象条件によって変化する箇所における予測精度が低下するため、季節変動の影響を予め把握しておく必要性が高い。図5は、評価期間中の月平均軌道変位進みが、前月比で負値となった頻度別のロット数である。一般に、軌道変位は漸増するため、多くの負の進み量が観測される箇所では、季節変動が生じている可能性がある。例として負値が7回以上観測された30ロットに着目すると、全てがコンクリート路盤構造を含むことから、構造物の温度伸縮が軌道変位の季節変動として現れた可能性がある。そこで、このような箇所における推移の予測モデルを構築する。

ここでは、推移を傾向変動成分と季節変動成分の積で表す「季節調整法」と推移を水平成分、季節変動成分、不規則成分の積により表し、各成分に指数平滑処理を施した「Winters法」の適用を検討した。

① 季節調整法

本手法では、履歴データから軌道変位の各月の平均値 $\bar{\sigma}_i$ ($i=1 \sim 12$) を作成し、この12ヶ月移動平均により傾向変動値を得る。この値を線形回帰した際の傾きが軌道変位の増

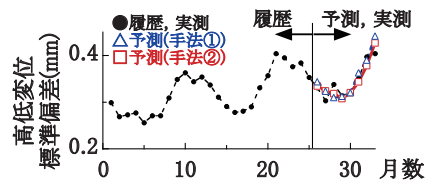


図6 軌道変位推移予測例(1)

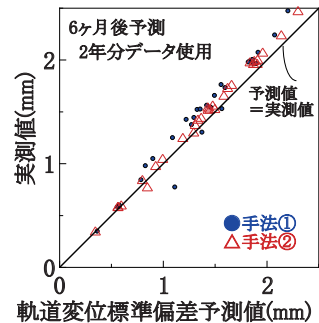


図7 季節変動箇所の予測精度

加傾向である。ここで、各月の平均値を傾向変動値で除した S_t は各月の季節指数であり、この値が1を挟んで大きく変動している箇所では、季節変動の程度が激しいと考えられる。以上により、式(2)から予測値を得ることができる。

$$\bar{\sigma}(i+L) = (T_0 + L \cdot \Delta T) \times S_{i+L} \quad (2)$$

$\bar{\sigma}(i+L)$: Lヶ月後の軌道変位予測値

T_0 : 予測開始時における傾向変動値

$$\begin{cases} S_{i+L} = S_{(i+L \bmod 12)} & (i+L \neq 12n, n \text{は整数}) \\ S_{12} & (i+L = 12n, n \text{は整数}) \end{cases}$$

② Winters法

本手法でも、軌道変位の各月の平均値を算出した上で、水平成分 M 、傾向成分 T 、季節変動成分 S の指数平滑値を式(3)により計算し、予測値を得る。平滑化係数 α, β, γ については、履歴データに基づいて誤差が最小となる組み合わせをロットごとに求める。

$$\left. \begin{aligned} \hat{M}_t &= \alpha(\sigma_t / \hat{S}_{t-1}) + (1-\alpha)(\hat{M}_{t-1} + \hat{T}_{t-1}) \\ \hat{T}_t &= \beta(\hat{M}_t + \hat{M}_{t-1}) + (1-\beta)\hat{T}_{t-1} \\ \hat{S}_t &= \gamma(\sigma_t / \hat{M}_t) + (1-\gamma)\hat{S}_{t-1} \\ \bar{\sigma}(t+L) &= (\hat{M}_t + L \cdot \hat{T}_t) \hat{S}_{t-j+L} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

t, j : 月 (j については1~12)

先述の方法で季節変動箇所を選択し、評価期間中に保守が実施されていないロットに手法①、②を適用して2

特集：軌道技術

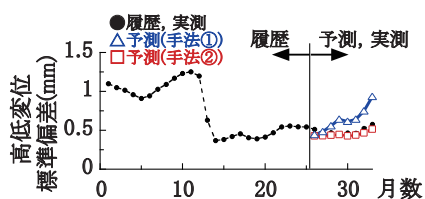


図8 軌道変位推移予測例(2)

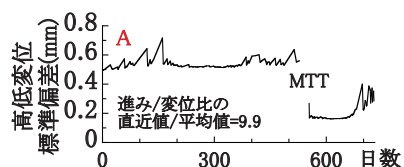


図11 軌道変位の推移例

年分の履歴データから6ヶ月後の軌道変位を予測した結果の一例を図6に示す。また、全ロットにおける予測値と実測値との比較を図7に示す。両手法とも予測値と実測値は近いが、手法①では誤差の最大値が0.33mmであり、短期間の予測での誤差としては大きい。一方、手法②では97%の確率で±0.16mm以下の誤差であった。

次に、途中で保守が実施されたロットに両手法を適用した結果を図8に示す。手法①では、予測値と実測値との差が手法②に比べて大きい。これは、手法①では傾向変動を得る際の回帰処理において、保守の実施に関係なく履歴データを直線で近似したためである。一方、手法②では、保守実施時には実測値を推定値の代わりに用いるため、実測値と予測値とは近い。

以上より、季節変動箇所の軌道変位推移を予測する際には、手法②の方が良いが、平滑化係数の設定処理に時間を要するという問題がある。よって、保守実績の有無に応じて手法①、②を使い分けるのが良い。

(3) 軌道変位の急進箇所の選定法

高頻度検測の利点として、軌道変位の急進等、急激な変化を把握できることが挙げられる。よって、急進管理のための検測データ処理方法について検討する。

軌道変位の急進評価指標としては、これまでに「軌道変位進み/軌道変位」という比(進み/変位比)の長期的傾向と直近の傾向の間に大きな差異が生じた場合(直近の方が著大)に、急進の可能性が高いと判断する手法を提案している⁵⁾。そこで、本指標を高頻度検測データに適用し、その有効性を評価する。

進み/変位比の長期的傾向(平均値)と直近値の関係を図9に示す。両者の間に相関はあるが、一部に直近値の方が著しく大きな箇所がある。ここで、進み/変位比の直近値/平均値を算出して図10に示す。直近値/平均値は平均的には1に近いが、直近値が平均値の10倍近い箇所が存在する。そこで、特に大きな箇所(図中のA)における軌道変位の推移を図11に示す。Aでは軌道変位自体は小さいが、650日付近以降の進みは大きい傾向

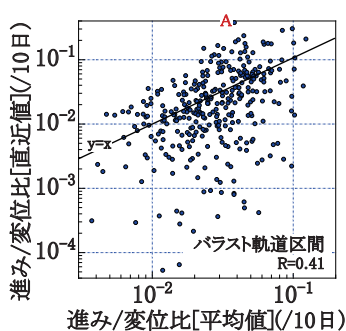


図9 進み/変位比

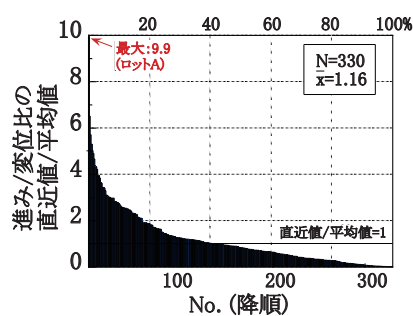


図10 進み/変位比の直近値/平均値

にあり、進み/変位比の直近値/平均値は9.9とかなり大きい。このように、進み/変位比は、高頻度検測データにおいても急激な傾向変化箇所の選択に有効であると考えられる。しかしながら、直近値の大きな他の箇所を含めて、この後、実際に急進したという実績はなく、軌道変位は一時的に増加しても、その傾向は継続しない場合が多い。よって、直近値を平均値と対照するだけで急進の有無を判定すると、急進箇所を過剰に選択する可能性が高い。

以上のことから、著しい変位進みを想定して進み/変位比の閾値を大きく設定して急進箇所を選択する方法と合わせることで、上記より小さな閾値を設けた上で、比較的大きな進み/変位比が連続して観測された箇所を選択するという方法を併用することが考えられる。特に、連続的な観測値を用いる方法は、高頻度検測データでは有効と考えられる。

2.3 材料状態評価指標に関する検討⁵⁾

(1) レール状態の評価

一般に、レール凹凸量と軸箱加速度の間には相関があるため、軸箱加速度をレール状態の評価に用いることができる。そこで、レール溶接部での落ち込みや波状摩耗の波長を考慮して、波長0.075~0.25mでBPF処理した軸箱加速度を用いる。ここで、軸箱加速度は軌道変位進みに比べて検測毎に変動する傾向が強いが、時間の経過に伴う漸進的な増加は遅いと考えられる。よって、このような変動や特異値の存在を考慮し、直近何回分かの軸箱加速度を平均して状態を評価することを考え、この平均化期間の適正値を検討する。

軸箱加速度を平均化する検測回数と軸箱加速度の関係を図12に示す。1.5ヶ月以上の期間における測定値を平均化すれば、軸箱加速度の変動は一定の範囲に収束する傾向がある。よって、直近1.5ヶ月以上のデータを平均化して評価することが適当と考えられる。

(2) 道床状態の評価

軌道変位保守改善量が小さい、或いは改善効果の持続性が低い箇所では、道床状態が不良である可能性が高い。そこで、図13に保守前の軌道変位と改善量の関係を示す。

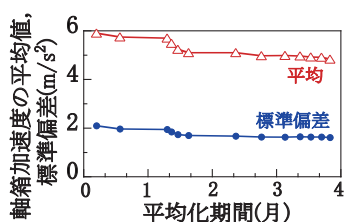


図 12 軸箱加速度の平均化期間

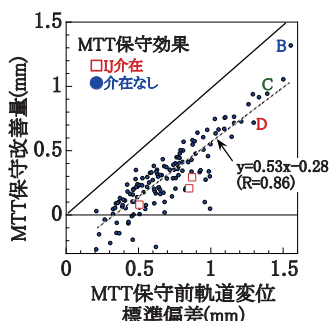


図 13 軌道変位保守改善量

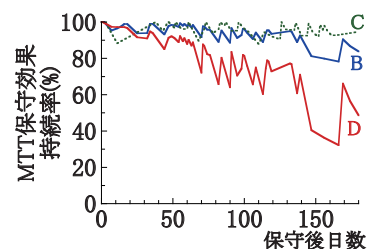
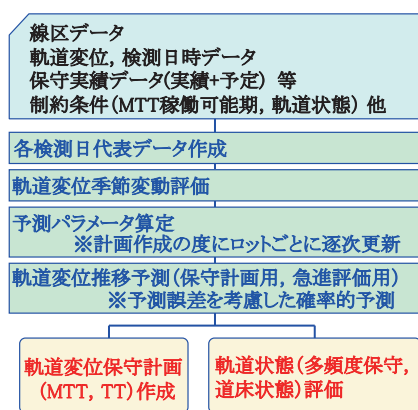


図 14 軌道変位保守の改善効果の時間変化



(a) 計画モデルのフロー



(b) システムの画面例

図 15 高頻度検測データ対応版軌道変位保守計画モデル, システム (h-MTS)

保守前の軌道変位が大きいと改善量は増える傾向が明確であり、従来の検測頻度のデータによる同様の分析結果より相関が高い。また、IJ（接着絶縁継目）の介在箇所での改善量は非介在箇所より少ない傾向にある。高頻度検測データでは、これらの傾向を把握しやすいと考えられる。

また、一時的には十分な改善量を得られても、短期間で保守前の軌道変位に戻ってしまう箇所を精度良く選択することは、従来頻度の検測データでは難しかったが、高頻度検測データによれば可能と考えられる。そこで、保守前の軌道変位に近いロット B～D における保守から t 日経過後の改善量を保守直後の改善量で除した「保守効果持続率」の時間変化を図 14 に示す。B, C では保守後の改善量が半年後も十分に維持できているが、D では徐々に減少していく様子を確認できる。

以上のように改善量の程度や時間的な変化を分析することで、道床状態を精度良く評価でき、道床交換計画を有効に策定できると考えられる。

3. 高頻度検測データ対応版軌道変位保守計画システム

3.1 システムの概要

従来の軌道変位保守計画システム (MTS)¹⁾ を高頻度検測データに対応させるために、以下に示す機能等を

追加し、図 15 に示すシステム (h-MTS) を開発した。

①各検測日の代表データ作成

各検測日を代表する 1 データを作成する。この際、軌道変位が前後の検測時と比べて大きく異なる（保守による減少を除く）データを異常値として除外する。

②平滑化係数のロット別最適値算出

ロット別に平滑化係数の最適値を算定して予測する。

③ MTT 保守改善量の算定

MTT 保守改善量の推定式を軌道変位保守実績に基づいてロット別に設定する。

④軌道変位推移予測

軌道変位進みと保守改善量の履歴データに基づいて、将来の推移を確率分布としてロット別に出力する。

⑤道床状態評価

保守による改善量等を評価して道床状態を評価する。

⑥軌道変位急進評価

進み/変位比を用いて、軌道変位の急進評価を行う。

⑦平滑化係数、保守改善量算定式の更新

新たに軌道検測データが追加された際には、平滑化係数を更新する。また、軌道変位保守実績が追加されたロットについては、保守改善量算定式を更新する。

3.2 システムの適用例⁶⁾

h-MTS に在来線の高頻度検測データを適用し、半年

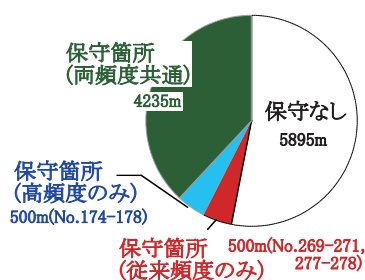


図 16 保守箇所の比較

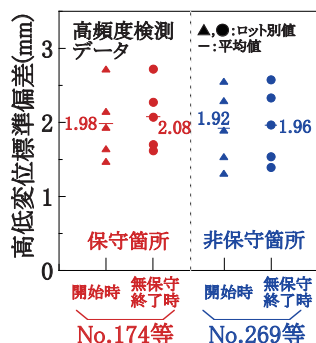


図 17 軌道変位の予測値

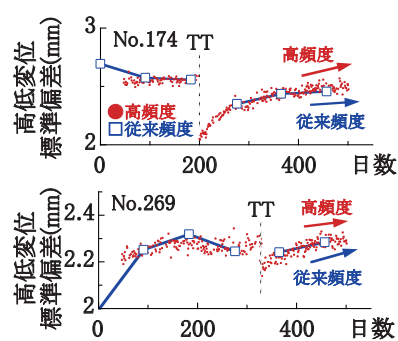


図 18 軌道変位推移の比較

分の軌道変位保守計画を作成した。計画条件と適用結果を以下に示す。

(a) 計画条件

計画条件等を以下に示す。また、従来の MTS との比較を行うために従来の測定間隔（概ね 3 カ月に 1 回）で取得したデータ（従来頻度検測データ）を用いて同一期間の計画を作成した。

- ①線区長：21.5km
- ②データ取得期間：約 16 ヶ月分（1～7 日毎）
- ③ 1 回の保守区間長：連続 5 ロットを標準とする

(b) 適用結果

図 16 には、保守計画 / 非計画箇所の判定について、使用したデータの検測頻度の違いにより区別して示した。各頻度の検測データを使用した場合における保守箇所は、ほぼ同じである。但し、約 10% の保守箇所が異なり、この違いは以下のような事由によると考えられる。

図 17 は保守箇所が異なる 5 ロットにおける軌道変位とその平均値を高頻度検測データの場合について示したものである。高頻度検測データを使用した計画では、No. 174～178（No.174 等）のロットの方が No. 269～271, 277～278（No.269 等）よりも計画開始時や無保守終了時の軌道変位が平均的には大きい。一方、従来頻度検測データを使用した場合では、No. 269 等の方が計画開始時や無保守終了時の平均的な軌道変位は大きかった。このように、両データ間で軌道変位予測値に差が存在し、本システムでは軌道状態が不良な区間を優先して保守箇所として選定するため、保守箇所に差異が生じたと考えられる。

以上の差異の発生理由を分析するために、高頻度検測データの使用時にのみ保守箇所を選択された No. 174 と従来頻度検測データの使用時にのみ選択された No. 269 の各ロットの軌道変位推移を図 18 に示す。両ロットとも TT 保守の実績があり、No. 174 では TT 保守後、高頻度検測データでは保守後に軌道変位がある程度進んだ後、ほぼ一定の進みとなる様子を確認できる。従来頻度検測データにおいても推移は近いが、高頻度検測データを使用した場合に比べて軌道変位進みは小さく推定される。この結果、高頻度検測データを使用した場合の方が軌道変位

が大きく予測される No.174 ロットが保守箇所を選択されたと考えられる。一方、No. 269 についても、軌道変位は TT 保守後に保守前の状態に短期間で戻り、軌道変位進みが徐々に緩やかになる様子が高頻度検測データには現れている。これに対し、従来頻度検測データでは、保守後のデータ数が 2 点しかないため、上述のような進みの鈍化を把握できない。このため、高頻度検測データを用いた場合に比べて軌道変位は大きく予測され、保守箇所を選択されたと考えられる。

以上のように、高頻度検測データを用いることで、軌道変位の推移を正確に把握できることから、軌道変位保守計画の品質は従来頻度検測データでの計画に比べて向上することが期待できる。

4. まとめ

高頻度検測データの適切な処理、活用法を提案し、また高頻度検測データに対応した軌道保守計画支援システムを開発した。高頻度検測については、今後、更に普及が進み、データが蓄積されていくと考えられることから、提案した手法の妥当性の検証や精度向上等の改良を継続的に行う必要がある。

文献

- 1) 佐野他：高頻度軌道検測データの効率的な活用方法，鉄道技術連合シンポジウム J-RAIL 2014，2014
- 2) 三和他：マルチ作業計画作成システム，JREA，2003.7
- 3) 吉田他：軌道状態評価モデルの新幹線軌道への適用とシステム化，土木学会第 67 回年次学術講演会，2012.9
- 4) 佐野：高頻度軌道検測データの効率的な処理・活用法，日本鉄道施設協会誌，2015.4
- 5) 三和他：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，鉄道総研報告，Vol.26, No.2, pp.13-18, 2012
- 6) 山口他：高頻度検測データを活用した MTT 運用計画支援システムの開発，土木学会第 70 回年次学術講演会，2015.9(予定)