

高頻度検測データに対応した 軌道変位の局所的な急進箇所抽出・予測法

田中 博文* 山本 修平**
大島 崇史* 三和 雅史*

**Methods for Detecting and Predicting Localized Rapidly Progressing Deterioration
of Track Irregularity Based on the High Frequency Measured Data**

Hirofumi TANAKA Syuhei YAMAMOTO
Takashi OSHIMA Masashi MIWA

In this study, we developed methods to detect and predict localized rapidly progressing deterioration of track irregularity based on the high frequency measured data. First of all, a highly accurate positional correction technique was developed. This technique searches for such phase that the correlation coefficient between waveforms of the different measured data becomes the maximum, and corrects a gap of phase. The automatic extracting of a localized rapidly progressing deterioration of track irregularity became possible from the difference of the measured data of which the positions were corrected. Secondly, a predicting technique of track irregularity was developed. This technique predicts the track irregularity stochastically by updating new measurement data by Bayesian inference. Finally, we applied these techniques to the field data, and confirmed the effectiveness of the techniques.

キーワード：営業車モニタリング，高頻度検測，位置補正，急進把握，軌道変位進み予測

1. はじめに

近年、慣性正矢軌道検測装置¹⁾等の小型の軌道検測装置が国内外で実用化されており、これを営業車に搭載することによって従来の軌道検測車よりも高頻度な軌道検測が可能となってきている²⁾。そのため、大量に取得された軌道検測データを効率的に処理し、軌道の維持管理に活用する手法の開発が課題となっている。

一般に、軌道検測データは、同じ区間を複数回走行した場合でも、検測車両の車輪の空転や滑走によって検測データごとに検測延長に差が生じる。そのため、軌道検測車では、この検測延長の差を補正するために、地上にデータデポ等の地上子を設置し、その検知信号を用いて位置の補正を行っている。このデータデポは、1km程度の間隔で設置されることが多く、この間隔での概略的な位置補正がなされている。しかしながらこの手法では、検測データ間の位置補正は行っていないため、検測日や検測時間の異なる検測データ間には微小な位置ずれを許容していることになる。したがって、別々に検測した2つの波形の差分を単純に求めても軌道変位進みを正確に算出することはできず、ある一定区間の波形の標準偏差

を用いて軌道の劣化度合いを判断することが多く行われてきた³⁾。この方法は、MTTによる軌道整備箇所の抽出等、一定区間の軌道状態の劣化を判断するには適しているが、局所的な軌道変位の急進に対する感度は相対的に低い指標といえる。

そこで、本研究では、高頻度に検測された軌道変位データを用いて、局所的な軌道変位の急進箇所を早期に把握し、適切な保守を可能とする手法を開発した。まず、局所的な軌道変位の急進箇所を自動抽出するために、別々に検測した2つの検測データの波形間の相関係数が最大となる位相を探索して位置ずれを高精度に補正する手法を開発した。そして、測定日の異なる検測データの差によって局所的な軌道変位の急進箇所を自動抽出する手法を開発した。さらに、このようにして抽出された急進箇所について、検測の度に軌道変位進みをベイズ推定により逐次更新することで、将来の軌道変位の推移を予測する手法を開発した。最後に、これらの手法を実データに適用し、その有効性を確認した。

2. 相互相関法による高精度な位置補正手法

2.1 相互相関法による位置補正アルゴリズム

開発した位置補正手法では、別々に検測した2つの検測データの差分に基づいて、局所的な軌道変位急進箇

* 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）

特集：軌道技術

所を抽出することを目的に、検測データ間の位相を合わせるだけでなく、両データ間でデータ個数およびサンプリング間隔を完全に一致させることとした。図1に、新たに提案する位置補正手法の概念図を示す。この位置補正手法は、位相合わせおよびリサンプリングの2つのステップで構成される。

まず、位置補正の基準となる検測データ（以下、「基準データ」という）、およびそれに対して位置補正がなされる検測データ（以下、「修正対象データ」という）を指定する。そして、図1(a)に示すように、基準データに対して一定間隔ごとに修正対象データの位相を微小に変化させながら、式(1)を用いて両データ間の相互相関関数 $\tilde{r}(\tau)$ が最大となる位相ずれ量 τ^* を算定し、その分だけ修正対象データの位相ずれ量を補正する。

$$\tilde{r}(\tau) = \frac{1}{\sigma(x)\sigma(y)} \cdot \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-\tau} \{x(n)y(n+\tau)\} \quad (1)$$

τ : 位相ずれ量

$\sigma(x)$: 一定区間内の基準データの標準偏差

$\sigma(y)$: 一定区間内の修正対象データの標準偏差

N : 一定区間内の基準データの個数

n : データ番号

$x(n)$: 基準データ

$y(n)$: 修正対象データ

次に、図1(b)に示すように、位相が合わされた一定区間中に含まれる基準データの個数と修正対象データの個数を完全に一致させるために、基準データのサンプリング点と対応する箇所において修正対象データのリサンプリングを行う。

本研究では、この相互相関係数を活用した一連の位置補正手法を、「相互相関法⁴⁾」と称している。本手法では、軌道変位の位置ずれは、その原理上サンプリング間隔以内、すなわち $\pm 0.25\text{m}$ 以内まで補正することが可能である。なお、相互相関法を適用する前に、事前処理として従来のデータデポによる概略的な位置補正を実施しておくことによって、位相合わせの探索範囲を縮小することが可能となり、計算の効率化が図られる。

2.2 位置補正に基づく波形の生成

以上のアルゴリズムに基づいて、位置補正後の検測データの波形は、図2に示すように生成される。まず、上述の一連の手順で、ある一定区間（以下、「ロット」という）の位置補正を行う。このロットの波形の終点位置情報を次のロットの始点位置情報として継承し、同様の手順で次のロットの位置補正を行う。この手順を繰り返すことで、全てのロットの詳細な位置補正を行う。

本手法では、検測データの途中で、軌道整備等によって波形の特徴が大きく変化することで位置補正が失敗したロットは、次に位置補正が成功したロットの情報を用

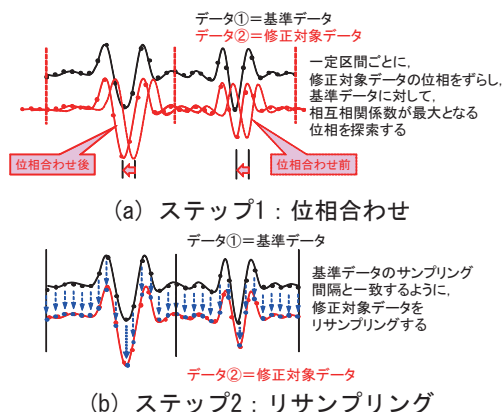


図1 新たに提案する位置補正手法の概念図

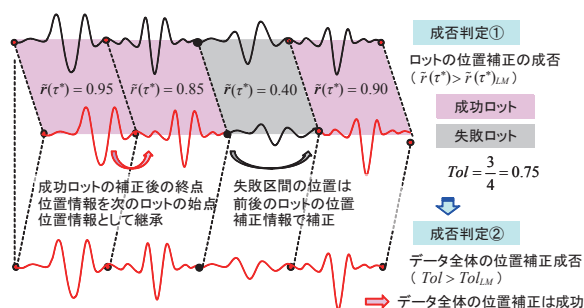


図2 検測データ全体の位置補正の概念図

いて、失敗ロットの位置情報を補正している。この位置補正の成否判定のために、本手法では2つのパラメータを導入している。

一つ目は、ロット内で算定する相互相関係数 $\tilde{r}(\tau^*)$ の下限値 $\tilde{r}(\tau^*)_{LM}$ である。 $\tilde{r}(\tau^*)$ がこの下限値を下回った場合、当該のロット内では位置補正が失敗したと判断される。二つ目は、相互相関法による位置補正の対象とするロットの数に対する位置補正が成功したロットの数の割合 Tol の下限値 Tol_{LM} である。 Tol がこの下限値を下回った場合、当該の検測データは、データ全体として相互相関法による位置補正が失敗したと判断される。

なお、相互相関係数を算定する適正なロット長は、位置補正を行う波形の周波数特性等に依存すると考えられるが、通常の検測データの場合、10～100m程度の範囲内で位置補正の成功率が高くなることを確認している⁴⁾。

3. 軌道変位の急進箇所把握法

3.1 差分データによる軌道変位進み箇所の判別手法

前述の相互相関法によって高精度に位置補正された、検測日や検測時間の異なる2つの検測データに対して、式(2)を用いて、単純に波形間の差分 $\Delta y(x)$ （以下、「差分データ」という）を求めることによって、軌道変位の変化の大きな箇所を自動的に抽出できる。

$$\Delta y(x) = y_{after}(x) - y_{before}(x) \quad (2)$$

$y_{after}(x)$ ：事後の検測データ

$y_{before}(x)$ ：事前の検測データ， x ：キロ程

ここで、差分データを用いて抽出した軌道変位の変化の大きな箇所の中には、実際の軌道変位の急進によって軌道状態が悪化した箇所と、軌道整備によって軌道状態が良好化した箇所が含まれる。特に、10m 弦正矢法で軌道検測した場合には、劣化箇所の両側に疑似波形が生じるため、振幅の増減だけでは単純に判別できない。一方で、本来、軌道整備箇所は、作業実績等を用いて軌道変位進み箇所から除外できることが望ましいが、営業車による高頻度検測の場合、日々取得される検測データから本手法を用いて軌道変位進み箇所を算定する前に、システム等に作業実績を入力し、これに基づいて検測データ間における作業の有無を判断することは難しい。そこで、作業実績を用いずに、軌道変位進み箇所と軌道整備箇所を自動で判定する手法が必要となる。

図3に、軌道変位進み箇所の判別フローを示す。判別は2段階に分けて行っている。まず、一定期間内に軌道変位進みがあったとしても、その変化が微小であれば、直ちに車両の走行安全性に影響を及ぼさないと考えられる。したがって、式(3)に示すように、1段階目では、軌道変位進みがあるしきい値（しきい値A）以下の箇所では、軌道変位の急進は無いと判断する。

$$\left. \begin{aligned} \Delta y > \alpha &: \text{軌道変位急進可能性箇所} \\ \Delta y \leq \alpha &: \text{急進では無い箇所} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Δy ：ある箇所での軌道変位進み

α ：しきい値A

次に、しきい値Aを超過した箇所について、その箇所を中心とする一定区間の検測データの標準偏差を算定する。その標準偏差が、式(4)に示すように、あるしきい値（しきい値B）以上悪化した箇所は、実際に軌道変位の急進があったと判断する。一方で、それ以外の箇所は軌道整備がなされた、あるいは軌道変位の急進は無かったと判断する。なお、しきい値Bには、実際の検測データに含まれる検測誤差等を考慮し、実態に合わせて設定すべきである。さらに、標準偏差の算定ロット長が長くなると、局所的な軌道変位進みに対する感度が鈍るため、算定ロット長を適切に設定する必要がある。なお、算定ロット長の適正值については、3.2.2項で検証する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{after} - \sigma_{before} > \beta &: \text{軌道変位急進箇所} \\ \sigma_{after} - \sigma_{before} \leq \beta &: \text{急進では無い箇所} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

σ_{after} ：事後の検測データの一定区間の標準偏差

σ_{before} ：事前の検測データの一定区間の標準偏差

β ：しきい値B

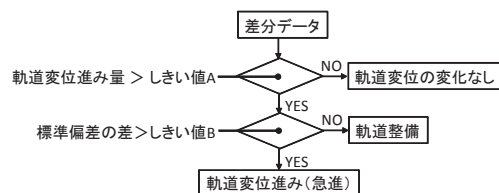
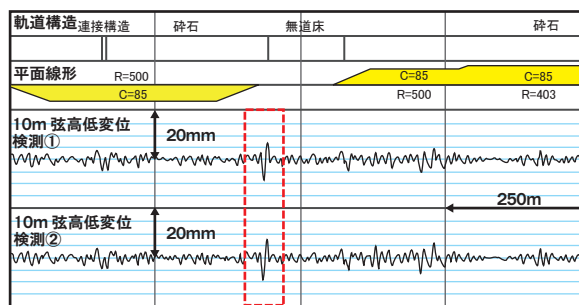
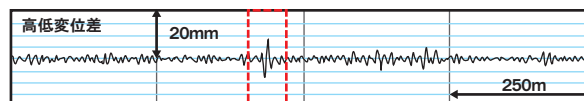


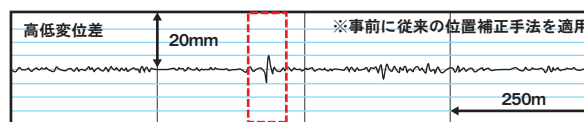
図3 軌道変位進み箇所の判別フロー



(a) 測定日の異なる2つの高低変位



(b) 従来の位置補正手法による高低変位差



(c) 相互相関法による高低変位差

図4 高低変位と高低変位差の例
(軌道変位の急進を捉えた例)

3.2 高頻度検測データへの適用例

3.2.1 軌道変位急進箇所の抽出例

図4に、高頻度に検測された軌道変位データの一例として、検測日が7日間離れた2つの高低変位データおよびその差分（以下、「高低変位差」という）の例を示す。高低変位差には、従来の位置補正手法、および従来の位置補正手法を適用した上で相互相関法を適用した2通りの結果を示している。

図4(a)より、両波形間には、全体としては顕著な変化は見られない。しかしながら、図4(b)に示すように、従来の位置補正手法を適用した場合の高低変位差は、ほぼ全区間にわたって比較的大きな値となっており、前述した微小な位置ずれに起因して軌道変位進みが誤って算定されていることがわかる。一方で、図4(c)に示すように、相互相関法による位置補正を適用した場合は、高低変位差はほとんどの区間でゼロとなっているが、無道床区間（橋りょう）との境界部で3mm程度となっており、局所的な軌道変位の急進を的確に捉えていることがわかる。このように、相互相関法を適用し、検測データ間の微小な位置ずれを補正することによって、波形レベルでの軌道変位進みの算出が可能となった。

特集：軌道技術

3.2.2 軌道変位進み箇所と軌道整備箇所の判定例

図5に、高低変位差が3mm（7日あたり）を超過した箇所における、高低変位差の算出前後の波形の標準偏差を示す。図5(a)は軌道変位急進箇所、図5(b)は2回の検測間に軌道整備（タイタンパ（TT）による局所的な整備）が実施された箇所である。ここでは、最適な標準偏差のロット長を検証するために、ロット長を11m、25m、51m、101mと変更してパラメータスタディを行った。同図より、軌道変位の急進箇所では、波形を比較した前後で標準偏差が増加しているのに対し、TT施工箇所では減少しているため、標準偏差の増減に基づく判定法によって軌道変位急進箇所と軌道整備箇所を判定できることがわかる。また、ロット長が長くなるに従って比較した前後の標準偏差の差が小さくなっており、判定の感度が低下することがわかる。このことから、軌道変位急進箇所の判定には、11mあるいは25mロットの標準偏差が適していると考えられる。

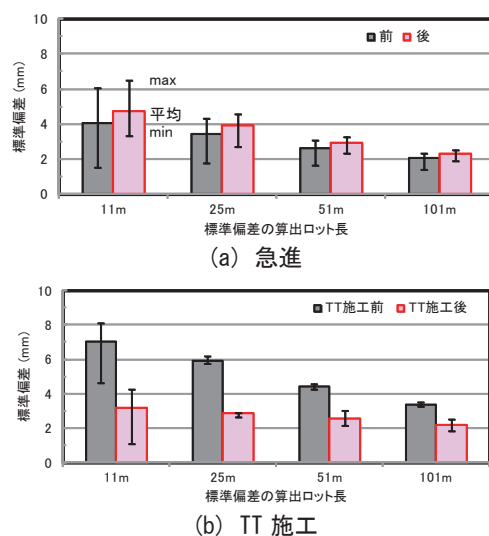


図5 軌道変位進み±3mm超過箇所の標準偏差の例

4. 軌道変位進み予測法

4.1 軌道変位進み予測モデルの概要

4.1.1 予測モデルへのベイズの定理の適用

高頻度で取得された軌道変位の履歴データから、軌道変位急進箇所の将来の軌道変位進みを予測するために、履歴データの統計的処理に基づく予測法を検討した⁵⁾。ここでは、軌道変位進みの予測に、「ベイズの定理」を応用し、新たに取得された検測データを用いて、それ以前の軌道変位進みを更新することで、最近の傾向の変化への追従性を高めることとした。この推定手法をベイズ推定という。

ベイズの定理とは、式(5)に示すように、事象の発生確率の分布（事前分布）を予め想定し、これに関わる新たな情報を取得した際に、事前分布を更新して新しい確率分布（事後分布）を得るという構造に特徴がある。すなわち、ベイズの定理は、新たな情報を加味して事後情報を作成する機械学習の一種である。

$$P(B|A) = \frac{P(A|B)P(B)}{P(A)} \quad (5)$$

$P(B|A)$ ：事象 A が起きた後の事象 B の発生確率（事後分布）

$P(A|B)$ ：事象 B が起きた後の事象 A の発生確率

$P(A)$ ：事象 A の発生確率

$P(B)$ ：事象 B の発生確率（事前分布）

ここでは、軌道変位進みを確率分布として考え、新たな軌道変位進みデータが得られた場合、軌道変位の予測にベイズの手法を適用することで、図6に示すように、軌道変位進みの最近の変動を反映した事後分布が得られる。なお、本手法は、軌道変位の急進箇所のみならず、

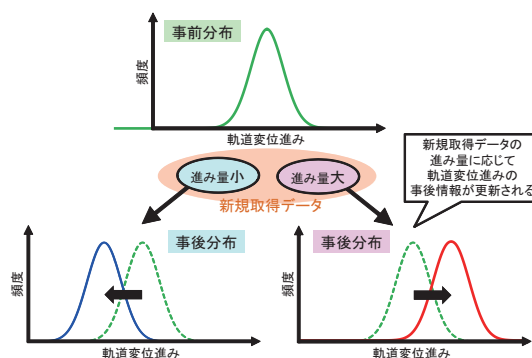


図6 ベイズの定理による軌道変位進み予測の概念図

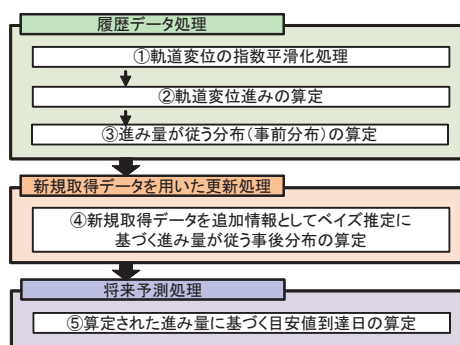


図7 軌道変位進みの予測フロー

任意箇所の軌道変位進みの予測に適用可能である。

図7に、軌道変位進みの予測フローを示す。軌道変位進みの予測は、任意地点の軌道変位の履歴データを入力として、事前分布を作成するための履歴データ処理、新規取得データを用いた更新処理による事後分布の作成、目安値到達日を算定するための将来予測処理、の大きく3段階に分けて行う。

4.1.2 履歴データ処理

軌道変位の履歴データには、何らかの理由によって異常値が含まれたり、検測誤差の影響によって、データにばらつきが生じる。このようなばらつきを含む軌道変位の履歴データから軌道変位進みを算定する際、ばらつきが大きいと、適切な予測ができない恐れがある。そのため、本手法では、図8に示すように、履歴データに指数平滑化処理を適用し、大きなばらつきを除去して進みの傾向を算出する。

その後、この平滑化した履歴データを用いて、各検測日における軌道変位進みを算定し、その進み量が従う分布、すなわち、軌道変位進みの事前分布を算定する。なお、この進み量の分布およびその平均値の分布は、共に正規分布に従うと仮定している。

4.1.3 新規取得データを用いた更新処理

新規取得データが得られた場合に、その傾向に基づいて前述の軌道変位進みの平均値が変動すると考え、この平均値の分布をベイズ推定により更新する。式(6)に、更新後の軌道変位進みの平均値 μ_a および標準偏差 σ_a を示す。なお、本手法では新規取得データ数は、1つでも複数でも良い。

$$\mu_a = \frac{\mu_b \frac{\sigma_a^2}{n} + \bar{\zeta}_n \sigma_b^2}{\frac{\sigma_a^2}{n} + \sigma_b^2}, \quad \sigma_a = \sqrt{\frac{\sigma_b^2 \cdot \frac{\sigma_0^2}{n}}{\sigma_b^2 + \frac{\sigma_0^2}{n}}} \quad (6)$$

- μ_a : 更新後の軌道変位進みの平均値
- μ_b : 更新前の軌道変位進みの平均値
- σ_a : 更新後の標準偏差, σ_b : 更新前の標準偏差
- σ_0 : 履歴データから求める軌道変位進みの標準偏差
- $\bar{\zeta}_n$: 新規取得データにおける軌道変位進みの平均値
- n : 新規取得データにおける軌道変位進みのデータ数

4.1.4 将来予測処理

次に、軌道変位進みの事後分布を用いて将来の軌道変位を予測する。 n 日後の予測値 x_n については、式(7)により表すことができる。ここで、更新後の進み量は確率変数であることから、 x_n も確率変数となるため、 x_n は確率分布として算定できる。この結果、予め設定した目安値に対してこれを超過する時期を確率的に算定できる。例えば、進み量の平均値を用いた場合の目安値到達日 t_a は式(8)により算定できる。

$$x_n = x_0 + n \cdot \Delta x \quad (7)$$

$$t_a = \frac{m - x_0}{\mu_a} \quad (8)$$

- x_n : n 日後の軌道変位の予測値
- x_0 : 最終検測日における軌道変位
- Δx : 1日あたりの進み量
- t_a : 目安値到達日, m : 目安値
- また、 n 日後までにおいて、平均値 μ_a , 標準偏差 σ_a を

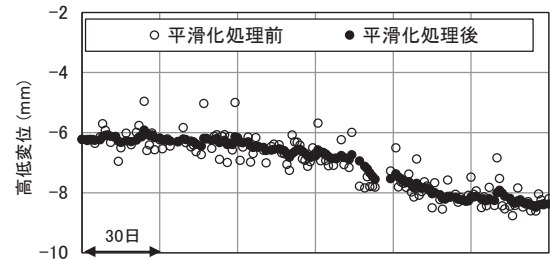


図8 軌道変位の履歴データに対する指数平滑化処理

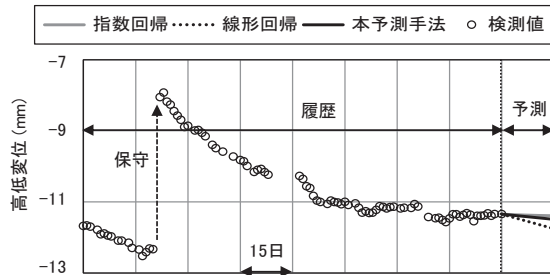


図9 高低変位の予測結果の例

有する進み量(1日あたり)の分布が n 日間繰り返されると考えた場合、進み量の分布を正規分布とし、各日の分布が独立であると仮定すると、 n 日あたりの軌道変位進みの分布の平均値は $n \cdot \mu_a$ であり、標準偏差は $\sqrt{n} \cdot \sigma_a$ として算定されるため、時間の経過と共に幅の広い分布が予測値の分布として現れる。したがって、任意の確率で目安値に到達する日を「目安値到達日」として算定することもできる。

4.2 高頻度検測データへの適用例と予測精度

4.2.1 予測精度の検証

図9に、在来線の営業車両で高頻度に検測された高低変位の履歴データに対して、本予測手法を適用した結果を示す。同図には、履歴データに対して、線形回帰して予測した結果、および指数回帰して予測した結果も示している。図9に示す箇所は、保守後に大きな進みがあり、その後は進みが徐々に緩やかになっていることから、一般にバラスト道床が沈下する過程の傾向と類似している。このような履歴期間中に傾向が変化する箇所では、線形回帰モデルでは保守後の大きな進みの影響を受けて、実際の傾向よりも進み量が過大に算定されてしまうが、指数回帰モデルと本予測モデルでは、直近の傾向に追従した予測結果が得られた。

次に、本予測手法の予測精度を検証するため、予測開始時から15日後の予測値と検測値の差を予測誤差と定義し、ランダムに選択した30箇所に適用した結果を表1に示す。同表より、今回構築した予測モデルが最も予測誤差が小さく、最大で1mm以内に収まっており、予測精度が高いことがわかる。したがって、指数回帰モデルや線形回帰モデルよりも、本予測モデルの方が実用性

特集：軌道技術

が高いと考えられる。

4.2.2 逐次更新の計算例

図10に、軌道変位進みの傾向が刻々と変化する条件下における高低変位の逐次更新による予測例を示す。同図に示すように、本手法では、傾向が変動する場合でも新たに検測データを取得する度に予測し直すことで、傾向に追従した予測を行うことができる。これがベイズ推定を用いた最大の効果であり、予測を逐次更新することで、傾向に追従した予測を行えることがわかる。

なお、事前分布の算定に用いる履歴データの期間や、逐次更新に用いる新規取得データの個数によって、予測精度は変化することがわかっており、今後、様々な線区、軌道状態の履歴データ、また高低変位以外の検測項目を対象に予測精度の検証を進めていく予定である。

4.2.3 目安値到達日の試算例

4.1.4項で述べたように、本予測モデルでは、将来の軌道変位を確率分布として予測することができる。図11に、一例として、高低変位を対象として軌道変位を確率的に予測した結果と、10mmを目安値と仮定した場合の到達日を確率の予測値で示している。この例の場合は、目安値到達日は90%の確率で23±2日と算定された。このようにして、目安値到達日を確率的に予測することによって、目安値に早く到達する可能性がある箇所については、早期に保守することが予防保全に寄与すると思われる。以上のように、予測値のばらつきを考慮することで、保守の優先順位の検討に活用できる。

5. おわりに

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 従来の位置補正手法では困難であった軌道変位の波形レベルでの軌道変位進みを算出するために、相互相関法という新たな位置補正手法を開発した。この位置補正精度は、原理上検測データのサンプリング以内、すなわち±0.25m以内である。本手法の適用によって、軌道変位データの差分から、軌道変位進みの大きな箇所を自動的に抽出することが可能となった。
- (2) 相互相関法によって位置補正された軌道変位の履歴データに対し、ベイズの手法を適用して将来の軌道変位進みを予測する手法を開発した。その予測精度は、今回検討した限りでは、1日に1回程度の頻度で軌道検測した場合における15日後の予測誤差は±1mm以内であった。また、本モデルでは軌道変位進みを確率的に予測するため、任意時期における

表1 軌道変位の予測誤差の算出結果

| | 線形回帰モデル | 指数回帰モデル | 本予測モデル |
|------|---------|---------|---------|
| 平均値 | 0.50mm | 0.26mm | 0.14mm |
| 標準偏差 | 0.74mm | 0.61mm | 0.40mm |
| 最大値 | 3.57mm | 2.14mm | 0.95mm |
| 最小値 | -0.68mm | -2.18mm | -0.76mm |

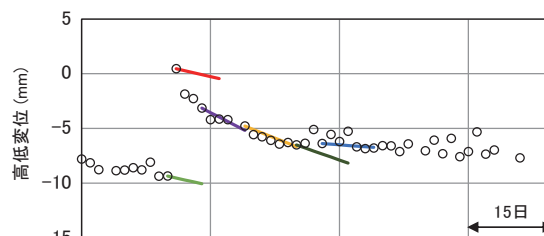


図10 高低変位の逐次更新による予測例

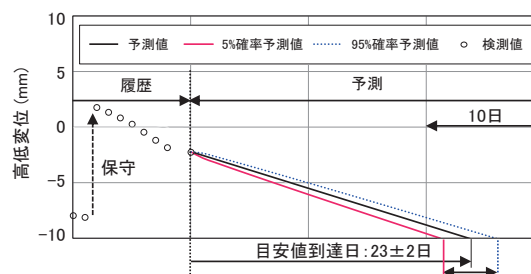


図11 目安値到達日の算定例

目安値の超過確率を算定でき、この確率に応じて保守の優先度を検討することが可能である。

文献

- 1) 坪川洋友, 矢澤英治, 小木曾清高, 南木聡明: 車体装架型慣性正矢軌道検測装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.26, No.2, pp.7-12, 2012
- 2) 葛西亮平, 西藤安隆, 小松佳弘, 小木曾清高, 矢作秀之, 小西俊之: 線路設備モニタリング装置の概況と今後の方向性, JR EAST Technical Review, No.55, pp.21-24, 2016
- 3) 佐野弘典, 三和雅史, 山口剛志, 吉田尚史, 矢坂健太, 坂口和弘: 高頻度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, 鉄道総研報告, Vol.29, No.8, pp.47-52, 2015
- 4) 田中博文, 山本修平, 大島崇史, 森忠夫, 西藤安隆: 相互相関法を応用した高頻度軌道検測データによる急進把握手法の開発, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.21, pp.1-8, 2017
- 5) 山本修平, 三和雅史, 田中博文, 嘉嶋崇志: 高頻度検測データの特性を考慮した軌道変位予測モデルの構築, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.21, pp.9-16, 2017