

# 高頻度軌道検測データの軌道変位管理への活用方法

軌道技術研究部 軌道管理研究室  
研究員 佐野 弘典

## 1. はじめに

軌道変位等を従来よりも高頻度に検測することで、軌道状態評価の精度向上や予兆管理によるリスク低減が期待できる一方で、膨大なデータを処理する必要があるため、その方法や活用法の確立が課題である。また、測定データ間において、何らかの要因により特異的な挙動・変動を示すことがあり、軌道変位進みは通トンにはほぼ比例すると仮定した既存の予測モデルでは、このような箇所の将来の軌道状態を予測することが難しいという問題がある。そこで、高頻度検測データを分析し、その適切な処理・活用方法について検討した。また、軌道変位の季節変動箇所を、履歴データから適切に選択し、将来の推移を予測する手法について検討した。

## 2. 高頻度軌道変位データの活用法

### (1) 高頻度軌道変位データの急進評価に関する検討

高頻度検測の導入の利点として、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。軌道変位の急進評価指標としては、これまでの検討において「軌道変位進み／軌道変位」という比（進み／変位比）の長期的な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）には、急進の可能性が高いと判断する手法が提案されている<sup>1)</sup>。そこで本指標を、平均検測間隔2.7日で測定された高頻度検測データに適用し、その有効性を評価する。

進み／変位比の評価期間2年半分の平均値と直近値の関係（バラスト軌道区間）を図1に示す。同図より、一部に直近値の方が大きな箇所が存在する。そこで、特に大きな箇所である図中のロットAにおける軌道変位の推移を図2に示す。ロットAでは、評価期間中を通じて軌道変位自体は小さいが、2013年11月付近以降の軌道変位進みは大きい傾向にあり、進み／変位比の直近値/平均値は2.7であった。このように、進み／変位比は高頻度検測データに対しても、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、ロットAの推移にも見られたように、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、進み／変位比の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ことは、急進箇所を過剰に選択する恐れが高い。

以上のことから、急進の判定を直近値だけで行う場合には、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、これにより急進箇所を選択する方法と合わせて、上記より若干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、後者による選択は、高頻度に検測できる場合には有効と考えられる。これらの閾値については、今回データを分析した線区では、軌道状態は極めて良好であって軌道変位の急進実績はなかったことから、検証事例を積み重ねながら適切な値を設定するのが良いと考えられる。

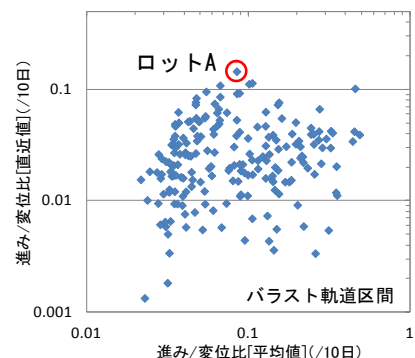


図1 進み／変位比の平均値と直近値の関係

## (2) 道床状態評価への活用

これまでに、道床状態評価法として軌道変位保守効果の評価に基づく方法が提案されている<sup>1)</sup>。この方法については、高頻度検測データを用いることにより、精度向上が期待できると考えられる。また、保守後短期間で保守前の軌道状態に戻ってしまう箇所を精度良く選択することについても、可能と考えられる。そこで、軌道変位保守改善量及び保守効果持続性を指標とした道床状態評価の有効性を検討した。

図3に保守前の軌道変位と改善量の関係を示す。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、かつ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。ここで、保守前の軌道変位が大きいにも関わらず、改善量が小さな箇所については、道床劣化の可能性がある。以上のような改善量の大小に基づく道床状態評価の精度は高頻度検測により向上すると考えられる。

次に、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」の時系列推移を算出した。結果の一例を図4に示す。ロットCでは保守直後から急激に減少し、大きく変動しながら1年経過後には元の軌道状態へと戻る様子が確認できる。このように保守効果が持続されない箇所は、道床状態の不良が疑われる箇所として抽出することができる。

以上のように、改善量の程度や時間的な変化を捉えることで、道床状態を従来よりも精度良く評価でき、道床交換等の保守計画を有効に策定できるものと考えられる。

## 3. 季節変動箇所の選択と予測法

### (1) 季節変動箇所の選択法

図5に、評価期間中（2011年10月～2014年1月）の月平均軌道変位が前月比でマイナス値（軌道変位が減少）となった回数の頻度分布を示す。一般に、軌道変位は漸増するため、多くのマイナス値が観測される箇所では、季節変動のような通トンによらない変化が生じている可能性がある。同図より、トンネル区間に比べ、明かり区間においてマイナス値の発生頻度が高い傾向が確認できる。ここで、評価エリアにおける月平均気温が最高、最小となる8月、1月及びその前後1ヶ月は、温度変化による軌道変位の変動が小さいと仮定した場合、2年3ヶ月の評価期間中にマイナス値が観測される回数は7～10回程度と想定される。したがって、ここではマイナス値が7回以上観測されたロットを季節変動箇所として選択した。選択された全45ロットのうち41ロットがコンクリート路盤構造を含む明かり区間であり、波形からも全てのロットで季節変動の傾向が確認された。このような箇所は構造物の温度伸縮等による影響を受けて変動している可能性が考えられる。また、

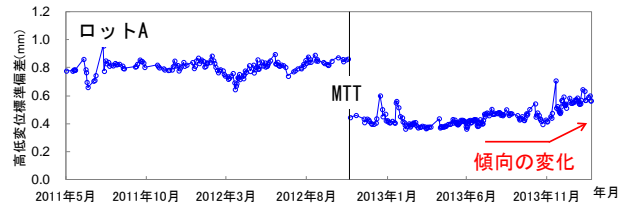


図2 変動が大きいロットの推移例

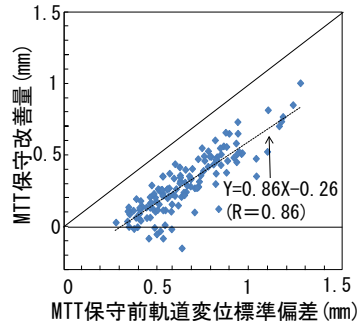


図3 軌道変位保守改善量

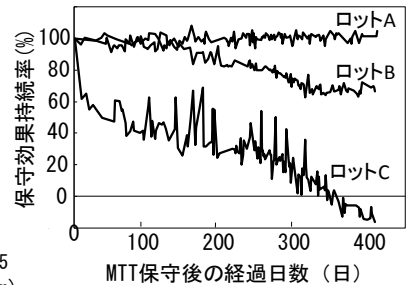


図4 保守効果持続率の推移

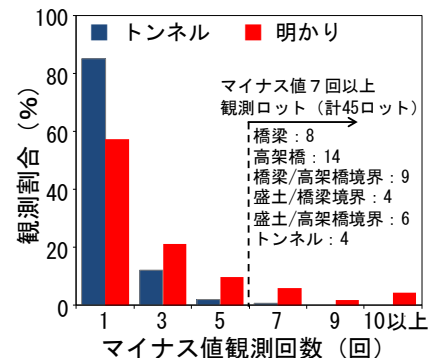


図5 マイナス値観測割合

トンネル区間においても全4ロットで季節変動が確認された。以上より、月平均軌道変位の推移を用いて、データ上から季節変動箇所を選択できることがわかった。

## (2) 季節変動箇所の予測法

季節変動箇所では、軌道変位が周期的に増減することから、

漸増を前提とした従来の予測モデルにより将来の軌道状態を精度良く予測することは難しい。そこで、時系列推移を傾向変動成分と季節変動成分の積として捉える季節調整法（乗法型）<sup>2)</sup>と、指数平滑法<sup>3)</sup>の2手法の適用を検討した。

### ① 季節調整法（乗法型）

まず、月平均軌道変位標準偏差 $\bar{\sigma}_i$  ( $i=1\sim 12$ ) に対して12ヶ月移動平均をとり、傾向変動値 $T_i$ を得る。ここで、月毎に得られた傾向変動値の差は、軌道変位進みと等価であることから、最小二乗法によって求めた回帰式により軌道変位増加傾向 $\Delta T$  (mm/月)を得る。

これに対し、 $\bar{\sigma}_i$ を $T_i$ で除した値 $S_i$ は、各月の季節指数を表しており、この $S_i$ が1を境に大きく変動している箇所は、季節変動の程度が高いと考えられる。

以上より、式(1)にてLヶ月後の軌道変位予測値を得る。

$$\bar{\sigma}(i+L) = (T_0 + L \cdot \Delta T) \times S_{i+L} \quad \dots\dots (1)$$

$\bar{\sigma}(i+L)$  : Lヶ月後の軌道変位予測値(mm)

$T_0$  : 予測開始月における傾向変動値(mm)

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

### ② Holt-Winters 法

まず、水平成分 $M_t$ 、傾向成分 $T_t$ 、および季節変動成分 $S_t$ の指数平滑値を式(2)により計算し、それらにより第t期の月平均軌道変位標準偏差 $\sigma_t$ の推定値を得る。ここで、式(2)内の平滑化係数 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ については、それぞれを0.1~1.0まで0.1毎に変化させた際の、実測値との誤差の標準偏差が最小となる組み合わせをロット毎に算出して適用する。

$$\hat{M}_t = \alpha(\sigma_t / \hat{S}_{t-j}) + (1 - \alpha)(\hat{M}_{t-1} + \hat{T}_{t-1}) \quad \dots\dots (2)$$

$$\hat{T}_t = \beta(\hat{M}_t + \hat{M}_{t-1}) + (1 - \beta)\hat{T}_{t-1}$$

$$\hat{S}_t = \gamma(\sigma_t / \hat{M}_t) + (1 - \gamma)\hat{S}_{t-1}$$

ただし、第u期の実測値が前月値に対して30%以上改善されている場合は、軌道保守が実施されたものとみなし、指数平滑処理は行わず（第u期の推定値）＝（第u期の実測値）とする。

以上より、式(3)にて第t期におけるL期先の軌道変位予測値を得る。

$$\hat{\sigma}_{t,L} = (\hat{M}_t + L \cdot \hat{T}_t) \hat{S}_{t-j+L} \quad \dots\dots (3)$$

j (月) : 1, 2, …, 12

この2つの手法を、前節にて季節変動箇所と選択されたロットのうち、評価期間中に一度も軌道保守が実施されていない全29ロットに対して適用した。なお、ここでは、2年分の検測データから、その後6ヶ月間の軌道変位標準偏差を予測した。予測結果の一例を図6に示す。

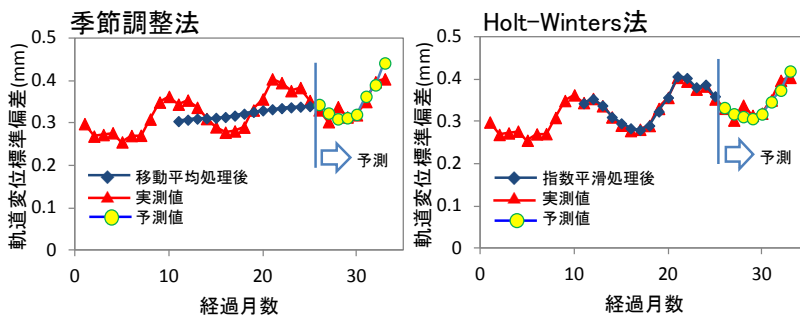


図6 推移例（評価期間中に軌道保守が実施されなかったロット）

また、6ヶ月後における予測値と実測値の比較を図7に示す。いずれの手法も、予測値と実測値は十分に近い。ただし、季節調整法での6ヶ月後予測の誤差の最大値は0.33mm程度であり、比較的短期間における予測としてはやや大きい。一方、Holt-Winters法での予測誤差最大値は0.1mm以下であった。

次に、評価期間中に軌道保守が実施されたロットに両手法を適用し、予測精度を比較した。図8に適用結果を示す。季節調整法を用いた場合、予測値と実測値との間に乖離が確認される。これは、季節調整法が実測値の12ヶ月移動平均により傾向変動を得ることから、この移動平均処理期間中に軌道保守が実施

された場合に、傾向変動成分の精度が著しく低下するためである。一方で、Holt-Winters法では、傾向変動成分についても指数平滑処理予測することや、軌道保守が実施された場合に、実測値を用いて計算することにより、実測値とほぼ同等の予測値を得た。

以上より、季節変動箇所の軌道変位状態推移予測を行うにあたっては、処理期間中に軌道保守が実施された場合等の予測精度の観点から、Holt-Winters法を用いて予測する方が適当であると考えられる。ただし、前述の通り、Holt-Winters法では3つの平滑化係数をロット別に最適化するための事前の処理が必要である点で、予測のための手間や時間がかかることに留意しなければならない。

#### 4. おわりに

高頻度軌道検測データを軌道変位管理に活用するためには、将来予測精度の向上や弱点箇所の把握等、目的や状況に応じて適切なデータ処理を行うことが重要である。なお、今回提案した活用法は、ある特定の線区データに基づくものである。よって他の線区における高頻度検測データの活用法を検討する際には、軌道変位進みの傾向や軌道材料状態等の条件が異なることが考えられることから、期間、間隔の適正值や平滑化係数のパラメータを改めて検討するのがよいと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 三和雅史, 木村寛淳, 山中雅司: 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, 2012. 2
- 2) 木村武: 季節調整の方法とその評価について, 金融研究, Vol. 14, No. 4, pp. 153-204, 1995.
- 3) 上條哲男: Wintersの予測システム-乗法的季節変動の時系列のための予測システム-, 上智経済論集, Vol. 49, No. 1, pp. 91-118, 2004

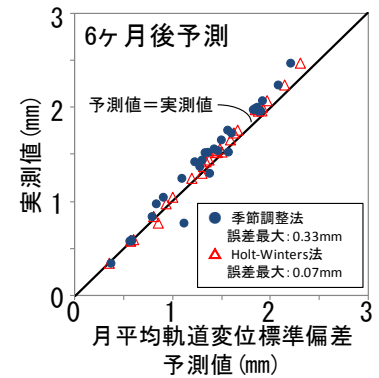


図7 実測値と予測値の比較

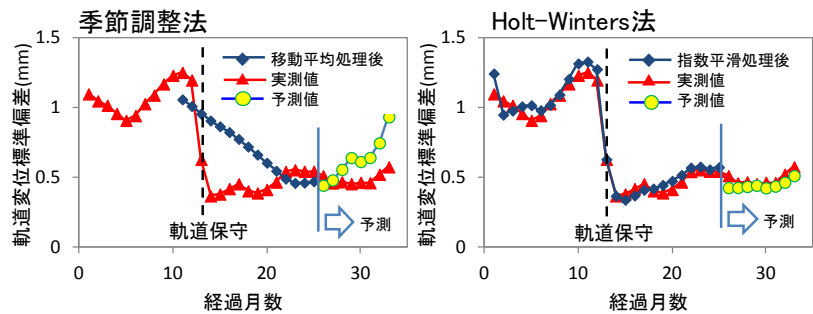


図8 推移例 (評価期間中に軌道保守が実施されたロット)