

多変量解析を用いた軌道変位異常箇所検知モデルの構築

5001305 (公財) 鉄道総合技術研究所  
2602780 (公財) 鉄道総合技術研究所  
1002750 政策研究大学院大学

\*松本 麻美 MATSUMOTO Mami  
三和 雅史 MIWA Masashi  
大山 達雄 OYAMA Tatsuo

1. はじめに

列車がバラスト軌道上を繰り返し走行すると、列車荷重により道床や路盤が沈下して、線路のゆがみである軌道変位が徐々に大きくなる。そこで通常は、定期的に軌道検測を行い計画的な保守を行う、しかし昨今、検測技術の向上により大量の履歴データが取得出来るようになっており、これらを活用して軌道等の異常箇所を検知し、またその劣化進行過程の予測結果に基づいて保守対応措置を推定する異常把握・管理法が求められている。しかし、軌道の劣化進行を予測する既往のモデル等では、直近の軌道変位の推移傾向から予測するため、過去に生じた軌道変位の急進等の履歴を考慮した異常検知が難しい。本研究では、軌道変位や保守実績等の履歴データに対してクラスタ分析手法を用いて、大きな軌道変位の発生可能性が高い箇所を検知するモデルを構築し、実データを用いた検証結果を示す。

2. 軌道変位異常箇所検知モデルの構築

1) 使用データと分析方法

軌道のゆがみである軌道変位のうち、本研究では上下方向のゆがみを表す高低変位を用いる。高低変位は一般に、図1のとおり、レールに基準弦をあて、その両端を結ぶ直線と弦の中央におけるレールとの離れを測定することで得られる。基準弦の弦長が10mの時に得られる高低変位を10m弦高低変位といい、これは鉄道事業者において軌道を管理する指標として広く用いられている。一方、基準弦の弦長が5mの時に得られる5m弦高低変位は、10m弦高低変位に比べて異常値がより顕著に検出される<sup>2)</sup>ことから、本研究の分析では5m弦高低変位の値を使用した。また分析にあたっては図2のとおり、軌道延長を100m毎にロット化し、このロット内の高低変位の最小値(図2中の赤丸)を用いた。分析対象は、年間通トン約1.7~2.5千万トンの全軌道延長5,589ロット/100m、貨物列車が走行しない高速線区、軌道検測頻度1回/10日のデータとした。クラスタ分析は、非階層のクラスタ分析(k-means)法を用い、あらかじめ定めるクラスタ数は5とした。これは、本線区の軌道変位に対して主に用いられている管理指標が保守目標値、整備目標値、著大値の3種類であり、これらの値が発生している3パターンの状態に加えて、軌道状態が安定している状態、およびスラブ軌道等の構造的に軌道変位が生じにくい状態の計5パターンを想定して設定した。

2) ロット選定とクラスタ分析法

分析方法の検証用として全ロットのうち500ロットを選定(選定ロット)した。モデル展開時の妥当性を考慮し、選定ロットは軌道構造等の割合が全ロットにおける割合と同程度になるよう図3のとおり選定した。クラスタ分析にあたっての指標は、高低変位に関する統計量等の他、構造物の介在等の13条件を用いた。高低変位に関する統計量については、軌道状態を表す際に一般に用いる高低変位の最小値と標準偏差に加え、検測期間中の軌道状態のばらつきや保守状況等を考慮できるよう最大偏差、改善回数、急進回数を用いた。これら5つの指標の詳細は表1に示す。構造物等については、構造物(分岐器、伸縮継目、接着絶縁継目、定尺レール)の介在有無、曲線半径、道床種別(バラスト、スラブ、境界)列車走行速度、通過トン数の8条件とした。これら計13条件を因子分析して得られたスクリープロットを図4、因子の負荷量をプロットしたものを

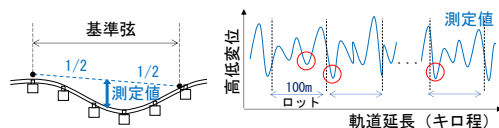
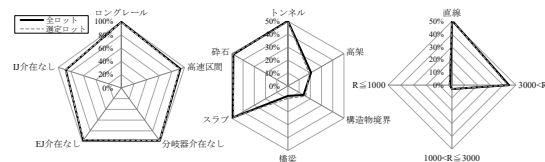


図1 高低変位の測定法 図2 ロット最小値の抽出



(a) 軌道構成等 (b) 構造物等 (c) 線形

図3 全ロットおよび選定ロット数の分布

表1 クラスタ分析に用いる指標

指標	概要
最小値	測定期間中の高低変位ロット最小値の最小値
標準偏差	測定期間中の高低変位ロット最小値の標準偏差
最大偏差	測定期間中の高低変位ロット最小値の最大値と最小値の差
改善回数	連続する測定日の高低変位ロット最小値が1mm以上改善した回数
急進回数	連続する測定日の高低変位ロット最小値が2mm以上急進した回数

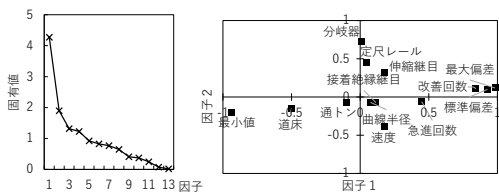


図4 スクリープロット 図5 因子負荷量のプロット

表2 クラスタ中心座標とロット数

クラスタ	最小値	標準偏差	最大偏差	改善回数	急進回数	ロット数
1	-11.4	1.8	9.6	11	2	6
2	-9.4	1.7	7.7	4	0	27
3	-8.1	1.4	6.0	8	0	19
4	-5.8	1.0	4.1	2	0	116
5	-2.5	0.2	1.0	0	0	332

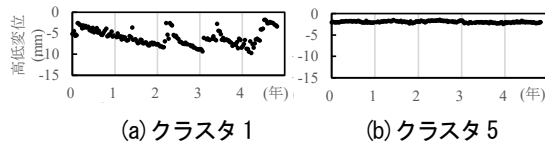


図6 軌道変位推移例

図5に示す。図4より、上位の5因子で固有値が1を下回ることから、クラスタ分析では5指標を用いることとした。また図5において、横軸に示す因子1の固有値は30.4%、縦軸に示す因子2の固有値は8.5%であり、固有値が高い因子は順に最大偏差、最小値、標準偏差、改善回数、道床種別、急進回数となった。データ取得の容易さや加工しやすさを踏まえ、最大偏差、最小値、標準偏差、改善回数、急進回数の5指標をクラスタ分析に用いることとした。

### 3) クラスタの特性分析

2)節で述べたデータと分析方法によりクラスタ分析を行って得られた、クラスタ中心座標およびロット数を表2に示す。なお、クラスタは軌道状態が悪い順に並べ替えており、クラスタ1と5に分類されたロットの軌道変位推移例を図6に示す。これより、改善回数以外の指標においてクラスタが大きいほど状態が良くなり、クラスタ5に半数以上のロットが分類された。図6からも、クラスタ1は高低変位の変動が大きく、クラスタ5は安定していることがわかる。各クラスタの特性を以下に述べる。

クラスタ1は全て、検測期間中に著大な高低変位を検出したロットであった。また高低変位のばらつきが大きく改善回数の多いロットが分類され、構造物の境界等、軌道状態が悪くなりやすいロットが多くを占めていることから、保守管理に注意を必要とするグループであると考えられる。クラスタ2および3は、大きな高低変位が時々発生しているロットが分類された。クラスタ2は軌道状態の割に保守頻度が低い傾向にあり、クラスタ3は定期的に保守されているロットが多かった。これは、クラスタ2は27ロット中25ロットが構造物等の介在により保守が困難な箇所であることから軌道状態の割に保守回数が少ない一方で、クラスタ3は現場でも軌道変位が大きくなりやすい箇所として管理されており定期的に保守されているようなロットが分類されている傾向にあるためと考えられる。クラスタ4は多少の高低変位の変動や保守があるものの、比較的落ち着いたロットが分類された。他クラスタと比べて、一般に軌道の弱点箇所になりやすい急曲線区間が多く含まれたが、

曲線半径が小さいと走行速度が遅くなり軌道変位が進みにくくなることから、軌道変位は安定していると考えられる。クラスタ5は高低変位が0mmに近い状態で変動なく推移しており、保守実績のないロットが分類された。軌道変位が生じないスラブ軌道や温度変化の少ないトンネル内にあるロットが半数以上を占めた。

### 3. 軌道変位異常箇所検知モデルの検証

#### 1) クラスタ特性と異常値

選定ロットのうち、検測期間中に著大値相当である高低変位-10mm以下となったロットと、目標値相当の-6mmから次回検測時に著大値相当となるような-4mm/10日以上の急進が発生したロットの計11ロットを異常ロットとした。これらの異常ロットは全てクラスタ1または2に分類され、その内訳はクラスタ1に5つ、クラスタ2に6つとなった。クラスタ1に分類された異常ロットは、軌道変位が常に大きく定期的に保守を繰り返しているものが多くを占め、クラスタ2には軌道変位の進みが落ち着いている期間があるものの時々急進が生じるようなものが分類された。なお、クラスタ1は6ロット中5ロットが-10mmを下回る著大値であったが、残り1ロットも高低変位-9.6mmでかつ保守回数も多いロットであったことから著大値相当であったと考えられる。

#### 2) クラスタ分析に基づく保守管理法

以上の結果より、クラスタ1から順に「要注意」、「準要注意」、「注意」、「安定推移」、「極安定推移」とグループ化することができる。軌道検測の都度本分析法を適用し、特に、「要注意」、「準要注意」、「注意」に分類されたロットを巡回等で軌道変位や材料状態の変化に注意して確認することで、著大値の発生や事後保守の防止に有効と考えられる。また前回検測値と比べて、今回検測値が注意を要する上位のクラスタに接近または移動したロットを抽出することによって、急進等に注意すべきロットを事前に検知できる可能性があると考えられる。

### 4. まとめと今後の課題

軌道の履歴データをクラスタ分析することで、分類されたクラスタ別に急進等を含む大きな高低変位の発生可能性を予測して軌道を管理する手法を提案した。今後は、因子分析、主成分分析、ロジットモデル等の手法を用いて、軌道の異常発生メカニズムの影響要因を探り、それらを計量的に推計する方法を提起することを目指している。

#### 【参考文献】

- 1) 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、第21回鉄道工学シンポジウム、No.2, pp.9-16, 2017.
- 2) 木村寛淳、田中博文、下野勇希：偏心矢を用いたバラスト軌道における高低変位急進箇所の効率的な検出手法、土木学会第65回年次学術講演会、IV-212, pp.423-424, 2010.