

## 多変量解析の適用による軌道変位異常箇所検知の効率化と検証

5001305 (公財) 鉄道総合技術研究所  
2602780 東京経済大学  
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、鉄道運輸収入が減少していることも背景として、検測技術の向上により得られる大量の履歴データ分析により、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の実施時期を決定する効率的な軌道管理法が求められている。筆者らは、クラスタ分析法を用いて、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手法を開発した。しかし、本手法は軌道状態による異常度の分類はできるが、異常発生や急進に影響する要因を定量的に評価することが出来ない。そこで本研究では、ロジスティック回帰により、軌道変位の異常を発生させる要因を定量的に分析する手法を構築した。

## 2. 軌道保守計画作成と軌道変位異常箇所検知

## 1) 軌道保守計画作成と軌道変位異常箇所検知の位置付け

鉄道事業経営の抜本的な見直しが求められる状況下において、効率的な保守計画を作成することが必要不可欠である。これまで我々は、軌道検測の履歴データから将来の軌道変位を予測し、最適な時期に保守を行うことにより、軌道変位の保守改善量を最大化するモデルを構築し<sup>2)</sup>、またそのモデルに基づいて保守用車両の運用計画を作成するシステム<sup>3)</sup>を開発してきた。本システムは、軌道変位の漸進的な劣化を前提とし、保守用車の最適運用計画を作成するものであるため、急激で局所的に発生する異常の検知や考慮を行えないという課題がある。よって本研究では、各箇所の異常発生可能性の定量的評価と計画作成時の考慮を実現するために、多変量解析手法を軌道の履歴データに適用し、軌道変位異常箇所を検知し、またその発生要因を分析する手法を検討した。

## 2) 使用するデータの概要

線路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により得られる。分析データは全軌道延長を100m毎にロット化し、各ロット内における軌道の絶対値最大値(図2中○印)を用いた。分析対象は、年間の通過トン数約1.7~2.5千万トン、全軌道延長約6,000ロット(全ロット)の高速線区で、1回/10日の頻度で軌道を測定

している。分析期間は約5年分とした。

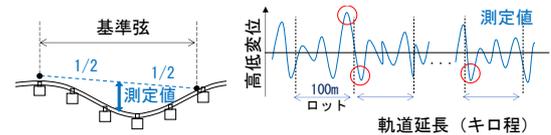
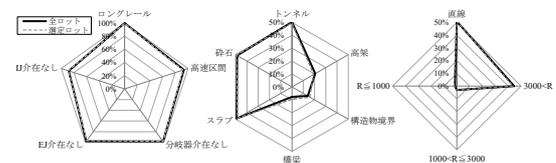


図1 高低変位の測定法 図2 ロット最小値の抽出



(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 分析に用いる変数(高低変位に関するもの)

変数	概要
最大値	ロット内絶対値最大値の分析期間中の最大値
標準偏差	ロット内絶対値最大値の分析期間中の標準偏差
最大偏差	ロット内絶対値最大値の分析期間中の最大値と最小値の差
改善回数	ロット内絶対値最大値が分析期間中に1mm以上改善した回数
急進回数	ロット内絶対値最大値が分析期間中に2mm以上劣化した回数

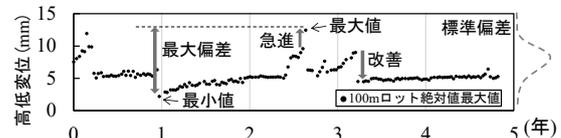


図4 分析に用いる変数の概要

## 3) サンプリング方法の概要

本分析では、モデル構築にあたり全ロットから500ロットを選定(選定ロット)した。本モデルを全ロットに展開する際の妥当性を考慮し、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。また分析に用いる変数は、高低変位のロット内絶対値最大値の時系列に関する統計量として、5年間の分析期間中の最大値と標準偏差に加え、保守状況等を考慮できるように最大偏差、改善回数、急進回数の5つの変数を用いた。各変数の概要を表1および図4に示す。

## 3. クラスタ分析法適用による軌道変位異常箇所の分類

クラスタ分析は、非階層のクラスタ分析のうちk-means法を用い、あらかじめ定めるクラスタ数は5とした。5つのクラスタに分類したところ、クラスタ1は高低変位の変動が最も大きいロット、クラスタ5は軌道状態が安定したロッ

トが分類されており、クラスタ番号が小さいほど、軌道状態に注意を要するロットであると判定できた。分類されたロット数はクラスタ1から順に6, 27, 19, 116, 332個であった。また、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、特に「要注意」、「準要注意」、「注意」に分類されたクラスタ1から3のロットを「異常発生可能性ロット」として、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、著大値の発生および事後保守の防止に有効と考えられる。

#### 4. ロジスティック回帰分析の適用

3章で述べたクラスタ分析により、52個からなる異常発生可能性ロットの集合(クラスタ{1,2,3})と448個のロットからなるそれ以外のロットの集合(クラスタ{4,5})の大きく2つのグループに分けられる。本節では特に、異常発生可能性ロットを発生させる要因に注目し、異常発生を抑制する手法に関する定量的な検討を、二項ロジスティック回帰モデルにより行う。さらに、異常発生可能性ロットのうち、保守対象とすべきロットにおける異常発生の影響要因を分析するため、クラスタ{1,2,3}において順序ロジスティック回帰モデルの適用を試みる。

##### 1) 二項ロジスティック回帰モデルによる判定

二項ロジスティック回帰を行うにあたり、従属変数としては、選定ロットのうちクラスタ{1,2,3}に含まれる異常発生可能性ロットを1、クラスタ{4,5}に含まれるロットを0とする。独立変数としては、軌道変位の発生と急進に影響する要因とされる10変数を用いることとした。各従属変数は表2に示すとおり、軌道変位に関するもの、軌道構造に関するもの、列車運転に関するものの3つに分類される。なお、表2に示すもののうち、高低変位に関する5変数は表1に示したものと同一である。

本分析の結果、10個中7個(最大値、標準偏差、最大偏差、改善回数、急進回数、運行速度、年間通過トン数)の変数については、他の変数と比較してWald値が小さく、有意確率が大きいことから、これらの変数が従属変数への影響度が小さいとみなすことができる。そこで、影響度の小さい変数を削減しながら変数選択を行うと、表3に示す結果が得られた。これより、異常発生可能性ロットが生じる影響要因としては、特に最大値、最大偏差、改善回数、運行速度の4つの変数が大きいことを示唆している。これらの変数のうち、最大値、最大偏差は高低変位に関する変数、改善回数は保守に関する変数、運行速度は列車運転に関する変数である。このことから、高低変位の異常が発生する要因としては、これらに関する変数のほうが、軌道構造に関する変数よりも影響が大きいということがわかる。

##### 2) 順序ロジスティック回帰モデルによる判定

クラスタ{1,2,3}の52ロットに対して順序ロジスティック

ク回帰分析を適用する。従属変数としては、クラスタ{1,2,3}の各ロットの値を1,2,3とする。独立変数としては、前節と同様の10変数を用いる。クラスタ{1,2,3}は全て直線区間のため、曲線に関する変数を除く9変数を用い、有意確率が大きくWald値が小さい変数を削減すると表4が得られる。これより、9変数の中で特に最大値、急進回数、改善回数の影響が大きく、これらが高低変位を急進させる確率を上昇させることを示唆している。ここで、最大値と急進回数は高低変位の変動に関する変数であり、改善回数は保守に関する変数であることから、高低変位の急進に大きく影響する要因としては、高低変位の変動に関する変数が、保守に関する変数や軌道構造、列車運転に関する変数より影響が大きいといえる。以上のことから、二項ロジスティックと順序ロジスティック回帰モデルのいずれにおいても、影響度の大きい変数としてほぼ同様の結果が得られており、これらの変数が高低変位の異常発生や急進に影響していることから、異常箇所

表2 ロジスティック回帰モデルの従属変数

関連分野	独立変数			
高低変位	最大値	標準偏差	最大偏差	改善回数、急進回数
軌道構造	バラスト、無道床、曲線			
列車運転	運行速度、年間通過トン数			

表3 二項ロジスティック回帰モデルの推計結果(4変数)

変数	z	標準誤差	Wald	有意確率	オッズ比
最大値	2.924	2.472	1.400	0.237	18.62
最大偏差	5.366	2.948	3.313	0.069	214.03
改善回数	4.223	2.229	3.590	0.058	68.21
運行速度	0.050	0.053	0.905	0.341	1.05
定数	-81.506	48.503	2.824	0.093	0.00

表4 順序ロジスティック回帰モデルの推計結果(4変数)

変数	z	標準誤差	Wald	有意確率	オッズ比
最大値	-1.629	0.406	16.06	<0.001	0.196
改善回数	0.274	0.147	3.500	0.061	1.310
急進回数	-1.330	0.460	8.350	0.004	0.265

#### 5. まとめと今後の課題

本研究では、ロジスティック回帰モデルを用いて高低変位の異常発生や急進に影響する要因を定量的に分析する手法を開発した。これより、軌道構造に関する変数に比べて、高低変位や保守に関する変数の影響が大きいことがわかった。今後は、これまで開発・検証してきた軌道保守計画作成システムに、本モデルで得られた保守対象ロットに関するデータを提供することにより、さらに効率的な軌道保守管理の計画作成が可能となると考えている。

##### 【参考文献】

- 1) 松本麻美、三和雅史、大山達雄：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，日本オペレーションズ・リサーチ学会，2022年春季研究発表会，2022。
- 2) Oyama, T., and Miwa, M., "Mathematical Modeling Analyses for Obtaining an Optimal Railway Track Maintenance Schedule," *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, Vol.23, pp.207-224, 2006.
- 3) Miwa, M., and Oyama, T., "An optimal track maintenance scheduling model analysis taking the risk of accidents into consideration", *International Transactions in Operational Research*, Vol.25, No.5, pp.1465-1490, 2018.