

クラスタ分析による軌道変位異常箇所検知法を 活用した軌道管理

松本 麻美* 三和 雅史** 大山 達雄***

Track Maintenance Using Track Irregularity Anomaly Detection Method Based on Cluster Analysis

Mami MATSUMOTO Masashi MIWA Tatsuo OYAMA

When a train repeatedly runs on a track, track irregularities, which are the distortion of tracks, gradually increase by wheel loads. The track irregularity is normally inspected periodically to perform a maintenance when a large track irregularity is detected. However, in rare cases, the track irregularity may increase locally and rapidly. To ensure the safety of train operation, preventive maintenance is required to detect the signs of such rapid increase of the irregularity to perform maintenance before it occurs. In this study, to identify a location in advance where large track irregularities are likely to occur, we have developed a mathematical model for the identification by applying the cluster analysis to historical data of track irregularity and maintenance records.

キーワード：異常検知，クラスタ分析，軌道変位，履歴データ，軌道管理

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って計画的な保守を行い、軌道形状を復元する¹⁾。しかし軌道は稀に、何らかの原因により路盤内に空洞ができて大きく陥没する路盤陥没や、バラストの劣化によって保守後も支持力が十分に回復せず発生する初期沈下等によって、軌道変位が局所的かつ急激に進む「急進」を起こすことがある。この急進は、列車の走行安全性を脅かし輸送障害や事故の発生につながる可能性があることから、列車の安定輸送のためには、急進が発生する予兆を検知し、発生箇所やその傾向を早期に把握して事前に軌道保守することが望ましい。

こうした急進を検知する手法として、一般的な軌道変位管理に用いる波長よりも短い波長の軌道検測データの経時変化を分析することで、急激な軌道変位進みの予兆が検出できる可能性がある²⁾。また軌道保守については、過去の軌道検測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で保守量を最小化するモデルの構築がなされてきた³⁾⁴⁾。さらに近年は、小型で高精度な軌道検測装置⁵⁾が開発され、営業列車に搭載することで1日に複数回のデータが取得できるようになり、この高頻度検測データを活用すること

で、局所的な軌道変位の進みを予測するモデル⁶⁾が開発されている。しかし、高頻度検測データの取得が難しい鉄道事業者や線区においては、こうしたモデルを適用することができない。また、高頻度検測データを取得できる鉄道事業者においても、これらのモデルは直近の軌道変位の推移傾向から予測するため過去に急進が生じた等の履歴を考慮することができないことや、データ数が多いために計算量が膨大となるという課題がある。

そこで本分析では、高頻度に軌道検測を行っている線区を対象とし、軌道を一定の延長（ロット）に分割し、各ロットにおける軌道変位の推移傾向に対し、その類似度に基づいてグループに分類するクラスタ分析を適用した。これにより、大きな軌道変位が発生する可能性が高い箇所を検知する軌道変位異常箇所検知法を構築した⁷⁾⁸⁾。本手法に実データを適用してその有効性を検証すると共に、本手法を活用した軌道管理について紹介する。

2. 軌道変位異常箇所検知法の構築

2.1 使用データと分析方法

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対象とする。鉄道事業者では一般に、基準弦の弦長が10mの時に得られる10m弦高低変位を管理指標として用いているが、本分析においては局所的な異常値がより顕著に検出できるとされる5m弦高低変位を用いた。異常箇所検知法を構築するにあたっては、年間通トン約1.7~2.5千万トン、全軌道延長約600kmの高速鉄道において、2015年から2020年度にかけておおよそ10日に1回の頻度で測定された軌道検測データ168検

* 軌道技術研究部 軌道管理研究室
** 元 軌道技術研究部
*** 政策研究大学院大学

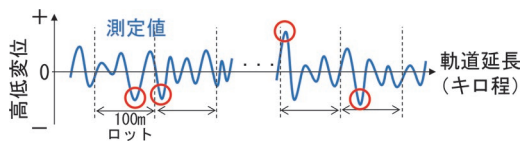


図1 ロット絶対値最大値（図中赤丸）の抽出

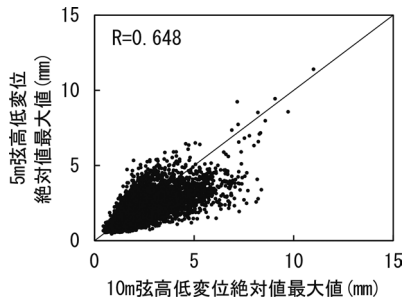


図2 5m弦高低変位と10m弦高低変位の相関

測分を使用した。

本研究で用いるクラスタ分析とは、類似度や近接度を基準にしてデータをグループ化する統計的手法であり、関係があるデータ同士の寄せ集めをクラスタという。クラスタ分析には主に階層的手法と非階層的手法の2つの手法があり、前者はクラスタ化の手順を系統的に積み重ねる手法で、データ量が少ないときに有効である。一方後者は、あらかじめクラスタ数を定め、各クラスタにデータを寄せ集めていく手法であり、一般に分析するデータ量が多い場合に有効である。本分析においては、データ量が多いことから非階層クラスタのk-means法を用いた。これは、各クラスタの中心に適当な初期値を与えて、各データを一番距離が近いクラスタに割り振った後、各クラスタの重心を新たな中心座標として再度各データを割り振り、この手順をクラスタの中心座標が変化しなくなるまで繰り返す手法である。本分析における各データ間の距離は、 n 次元空間の幾何学的な距離であるユークリッド距離により定義した。本分析では、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ものである。

分析にあたっては図1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絶対値の最大値（図1中の赤丸、以下、「高低変位絶対値最大値」という。）を抽出した。ここで、全軌道延長を100m毎に分割した5,589ロットを「全ロット」とする。図2に示す本線区的全ロットにおける5m弦高低変位と10m弦高低変位の相関より、両データ間には相関係数0.648と

概ね高い相関があることがわかる。先述のとおり、本図においても局所的な異常値は5m弦高低変位のほうが大きく検出される傾向にあるが、両者の差の二乗平均平方根をとると1mm程度であったことから、全体的には大きな差はないといえる。以上のことから、本線区における管理指標は10m弦で測定された高低変位の値により設定されているが、5m弦高低変位を用いた本分析においても、10m弦高低変位の値により設定された管理指標をそのまま用いた。

2.2 分析ロットの選定

分析にあたっては、データを簡素化し、また構築したモデルの検証用データを確保するため、全ロット（5,589ロット）における軌道構造や運転・線形条件等の構成割合と分析対象とするロットにおける構成割合が同程度になるように500ロット（以下、「選定ロット」という。）を選定した。表1に全ロットと選定ロットにおける軌道構造等の割合を示す。これより、軌道状態に影響を及ぼす軌道構造や運転・線形条件等の割合は同程度であることがわかる。

2.3 データ処理法

クラスタ分析にあたって、入力値となるデータは以下の手順で加工した。

- ①各選定ロットにおける測定期間中（168検測分）の5m弦高低変位絶対値最大値を算出する。
- ②①で算出した5m弦高低変位絶対値最大値の各指標を算出する。各指標は分析対象期間中における最大値、標準偏差、最大偏差、改善回数、急進回数の5指標とし、表2のとおり定義した。各指標の定義のイメージを図示したものを図3に示す。
- ③選定ロット毎に算出した各指標（500ロット×5指標＝2,500）をクラスタ分析の入力データとする。

ここで各指標について、最大値と標準偏差は大きいほど軌道状態が悪いことを表すと考えられる。改善回数は保守回数の多さを、最大偏差や急進回数は軌道状態が急激に悪くなる（または一度の保守で大きく良化する）傾向を表すと考えられる。一般に軌道状態が悪いと保守回数は多くなることから、最大値や標準偏差と改善回数には相関があると考えられる。改善回数の算出にあたっては、連続する測定日の5m弦高低変位絶対値最大値が1mm以上改善した回数としており、この数値は保守実績から算出した保守回数とおおよその整合性がとれるよう設定したものである。また、急進回数を算出するにあたっては、5m弦高低変位絶対値最大値が、10日後の次回検測までに2mm以上急進した回数とした。この数値は、本線区における管理指標のうち整備目標値（整備しなればならない値）と著大値（直ちに整備しなればならない値）の差が2mmであることから設定したものであ

表1 全ロットおよび選定ロットの割合

a) レール				
条件	全ロット		選定ロット	
	ロット数	割合	ロット数	割合
ロングレール	5,564	100%	496	99%
定尺レール	25	0%	4	1%
総計	5,589	100%	500	100%

b) 道床・軌道構造				
条件	全ロット		選定ロット	
	ロット数	割合	ロット数	割合
スラブ	2,739	49%	242	48%
バラスト	2,719	49%	246	49%
直結	2	0%	0	0%
境界	129	2%	12	2%
総計	5,589	100%	500	100%

c) 線形および曲線半径R(m)				
条件	全ロット		選定ロット	
	ロット数	割合	ロット数	割合
直線	2,834	51%	254	51%
3000<R	2,493	45%	219	44%
1000<R≤3000	169	3%	15	3%
R≤1000	89	2%	11	2%
複合・反復	4	0%	1	0%
総計	5,589	100%	500	100%

d) 構造物				
条件	全ロット		選定ロット	
	ロット数	割合	ロット数	割合
構造物なし	294	5%	21	4%
トンネル	2,813	50%	248	50%
トンネル坑口	113	2%	8	2%
高架	1,153	21%	96	19%
橋梁	433	8%	48	10%
構造物境界	783	14%	79	16%
総計	5,589	100%	500	100%

e) 走行速度				
条件	全ロット		選定ロット	
	ロット数	割合	ロット数	割合
高速区間	5,218	93%	461	92%
低速区間	371	7%	39	8%
総計	5,589	100%	500	100%

f) 分岐器				
条件	全ロット		選定ロット	
	ロット数	割合	ロット数	割合
分岐介在なし	5,483	98%	491	98%
1分岐介在	104	2%	9	2%
2分岐介在	2	0%	0	0%
総計	5,589	100%	500	100%

g) 伸縮継目				
条件	全ロット		選定ロット	
	ロット数	割合	ロット数	割合
伸縮継目なし	5,470	98%	483	97%
伸縮継目あり	119	2%	17	3%
総計	5,589	100%	500	100%

h) 溶接継目				
条件	全ロット		選定ロット	
	ロット数	割合	ロット数	割合
溶接継目なし	4,924	88%	444	89%
溶接継目あり	665	12%	56	11%
総計	5,589	100%	500	100%

る。なお、これらの指標および閾値は本分析における線区において設定したものであるため、条件の異なる線区等に適用する場合には適正值等を検討する必要がある。

2.4 クラスタの特性分析

本節では、前節のとおり処理した選定ロットをクラスタ分析した結果に基づいて、各クラスタが示す特性を考察する。

表3に分類されたクラスタを軌道状態が悪い順に並び替えたクラスタ中心座標および各クラスタに分類されたロット数を、表4にクラスタ中心座標間距離を示す。ここでのクラスタ中心座標は、繰り返し計算されたクラスタ中心のうち、各データが最も近いクラスタ中心に割り当てられた状態である最終的なクラスタ中心のことをいう。表3より、改善回数以外の指標においては、クラスタ番号が大きくなる順に軌道状態が良い値を示しており、またクラスタ5に半数以上のロットが分類された。クラスタ1においてはクラスタ中心が最大値、標準偏差、最大偏差、急進回数において最も軌道が悪い状態を表しており、また改善回数も最も多いことから保守頻度も高く、管理に注意を要するロットが選ばれている傾向にあることがわかる。一方クラスタ5におけるクラスタ中心は、軌道状態を表す指標が最も良い状態であることから、軌道状態の安定しているロットがクラスタ5に分類されたと考えられる。また表4より、距離が近いほど似た傾向を持つことから、クラスタ2とクラスタ3が最も近い特徴を持つ一方、クラスタ1とクラスタ5が最も異なる特徴を持つロットの集合であることが確認できる。

図4に各クラスタにおける中心座標からの距離が最短および最長となるロットの高低変位推移を示す。ここで、クラスタ中心座標からの距離は、距離が短いほど中心座標との類似性が高く、長いほど類似性が低いデータであることを示す。なお図4(d-2)については、中心座標からの距離が同じロットが2つ存在したため、2ロット分を図示した。以下にクラスタ毎の考察をまとめる。

a) クラスタ1

クラスタ1は、全てのロットにおいて、検測期間中に高低変位が著大値に相当する値を検出したロットであった。全てのロットがバラスト軌道であり、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た。また構造物境界となるロットが50%を占めており、さらに伸縮継目や溶接継目が介在している等、構造的に軌道状態が悪くなりやすいロットも多数を占めた。これらは高頻度に保守されているロットであると考えられ、急進も度々生じていることから、保守管理に最も注意を必要とするグループであると考えられる。また、全てのロットが曲線半径3,000m以上または直線区間の列車の走行速度が速い区間にあったことから、走行速度が速いほど

表2 クラスタ分析に用いる指標 (\min_d : 測定日 d における高低変位絶対値最大値)

指標	各指標の定義
最大値	高低変位絶対値最大値の測定期間中の最大値
標準偏差	高低変位絶対値最大値の測定期間中の標準偏差
最大偏差	高低変位絶対値最大値の測定期間中の最大値と最小値の差
改善回数	測定期間中において、連続する測定日の高低変位絶対値最大値が1mm以上改善 ($\min_{d+1} - \min_d < -1$) した回数
急進回数	測定期間中において、連続する測定日の高低変位絶対値最大値が2mm以上急進 ($\min_{d+1} - \min_d > 2$) した回数

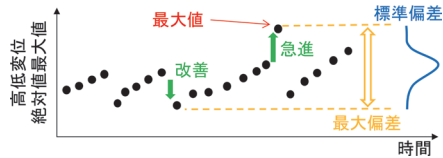


図3 クラスタ分析に用いる指標の定義のイメージ

軌道状態が悪くなりやすい傾向にあるといえる。

b) クラスタ 2

クラスタ 2 には、急進により著大値に近い高低変位が発生するようなロットが分類された。クラスタ中心座標間距離の近いクラスタ 3 と比べると、本クラスタは軌道状態が悪い割に保守頻度が低いロットが多い傾向にあった。軌道構造の境界部分や橋梁および構造物境界等、定期的な保守が困難で大掛かりな保守工事が必要となるロットが多くを占めていたことから、こうしたロットは、保守が困難であり、保守を行うまでに時間を要することが多いため、急進等にも注意を要するクラスタに分類されたと考えられる。

c) クラスタ 3

クラスタ 3 にも大きな高低変位が時々発生している

表3 クラスタ中心座標およびロット数

クラスタ	最大値	標準偏差	最大偏差	改善回数	急進回数	ロット数
1	11.370	1.837	9.607	11	2	6
2	9.436	1.746	7.696	4	0	27
3	8.112	1.374	6.024	8	0	19
4	5.843	1.026	4.070	2	0	116
5	2.481	0.206	0.957	0	0	332

表4 クラスタ中心座標間距離

クラスタ	1	2	3	4	5
1	-	7.168	5.598	11.739	16.381
2	-	-	4.685	5.598	10.591
3	-	-	-	6.951	11.192
4	-	-	-	-	5.025
5	-	-	-	-	-

ロットが分類された。クラスタ 2 のクラスタ中心座標と距離が近く似たような傾向を示しているが、本クラスタの方が保守頻度の高いロットが多かった。保守しにくい分岐器や伸縮継目、溶接継目が介在しているロットが多くを占めていたが、比較的定期的に保守がなされており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

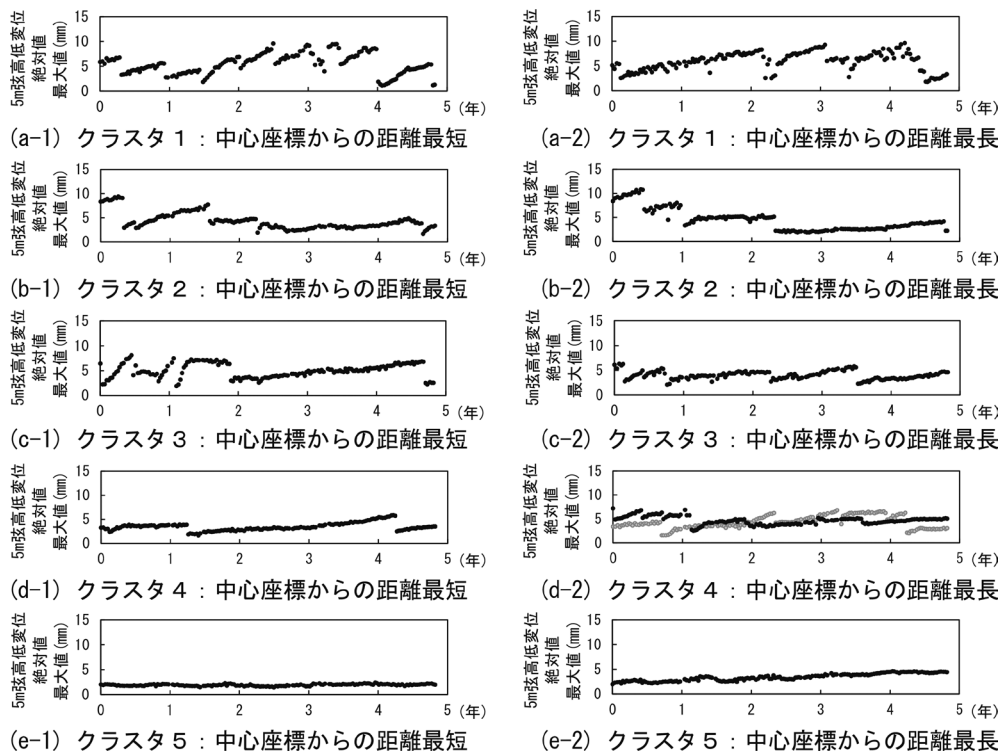


図4 各クラスタにおける中心座標からの距離が最長および最短となるロットの高低変位推移

いるロットが分類されている傾向にあると考えられる。

d) クラスタ 4

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、軌道状態が比較的落ち着いているロットが分類された。これは、他のクラスタと比べて列車の走行速度が遅い急曲線ロットが多く分類されていたことから、列車走行による軌道への衝撃が緩和され軌道変位が進みにくいためであったと考えられる。

e) クラスタ 5

クラスタ 5 は全クラスタ中、最も高低変位の変動がないロットであった。高低変位が 0mm に近い状態で変動なく推移しており、測定期間中に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気温変化の影響を受けにくいトンネル内にあるロットが半数以上を占めており、軌道状態が比較的安定しているロットが分類された。

以上の結果から、クラスタの数字が小さくなるにつれて、軌道の管理に注意を要するロットが分類されることが確認できた。

2.5 軌道変位異常箇所検知法

前節より、高低変位絶対値最大値の履歴データから、分析対象期間中の最大値、標準偏差、最大偏差、改善回数、急進回数の 5 指標をロット毎に算出し、これらの指標を用いてクラスタ分析することで、ロットの特性をグループ化することができた。あるロットがクラスタ番号の小さいクラスタに分類された場合、そのロットは軌道変位の異常が発生しやすいと考えられる。本分析の手順を軌道変位異常箇所検知法とした。

3. 軌道変位異常箇所検知法の検証

実際に大きな高低変位が生じたロットのデータに前章で構築した軌道変位異常箇所検知法を適用し、それらロットの検知精度を分析することにより、本手法の性能の検証を行った結果を以下に述べる。

3.1 異常発生ロットの定義と選定

選定ロットのうち、実際に大きな軌道変位や軌道変位進みが生じたロットを異常発生ロットとし、これらロットに軌道変位異常箇所検知法を適用することで、本手法

の検証を行った。

ここで異常発生ロットは、「軌道変位大ロット」、「軌道変位進み大ロット」、「著大値発生ロット」の 3 つの指標により以下の方法で抽出した。図 5 に、それぞれの高低変位推移例を示す。なお、図 2 で示した 5m 弦と 10m 弦高低変位絶対値最大値の相関より、ここでも 10m 弦高低変位の値により設定された管理指標をそのまま用いた。

・軌道変位大ロット (9 ロット)

5m 弦高低変位絶対値最大値が 10mm を超過したロットとする。本線区における著大値が、10m 弦高低変位で 10mm であることから設定した。

・軌道変位進み大ロット (1 ロット)

5m 弦高低変位絶対値最大値が、10 日後の次回検測までに 4mm 以上劣化したロットとする。これは、本線区における保守目標値が 10m 弦高低変位で 6mm であり、著大値が 10mm であることから、保守目標値に至ったロットが次回検測までに 4mm 劣化することで著大値に至ることから設定した。なお、本ロットとしては 1 ロット選定されたが、絶対値最大値が 9.6 mm であったことから、軌道変位大ロットと近い推移を示していると考えられる。

・著大値発生ロット (1 ロット)

本ロットは、実際に 10m 弦高低変位絶対値最大値が急進して 11.2mm を検出し、列車運行に支障したところのあるロットである。なお、この際の 5m 弦高低変位絶対値最大値は 11.4mm であったことから、本ロットは上記の軌道変位大ロットとも言えるが、小さな値で安定していた高低変位が急進した特徴的なロットでもあったことから、軌道変位大ロットと区別する。

3.2 クラスタ特性と異常値

これらの異常発生ロットを分類したところ、全てクラスタ 1 またはクラスタ 2 に分類された。その内訳は表 5 に示すとおり、クラスタ 1 に 5 ロット、クラスタ 2 に 6 ロットであった。クラスタ 1 に分類されたロットは、全てのロットが異常発生ロットのなかでも軌道変位が定常的に大きい傾向にあり、特に改善回数が多く、定期的に保守を繰り返しているようなロットであった。また、クラスタ 1 では 6 ロット中 5 ロットが異常発生ロットであったが、残りの 1 ロットも高低変位絶対値最大値が 9.6mm と大きく、軌道変位大ロットに近い挙動を示し

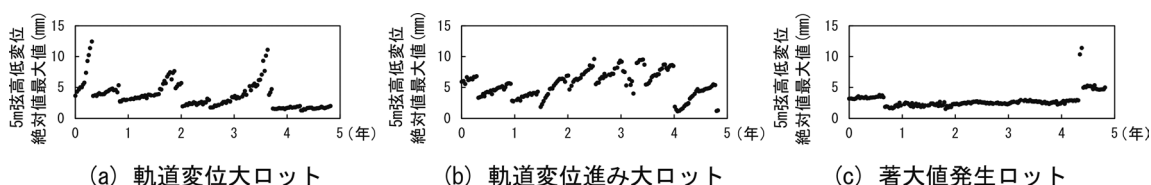


図5 異常発生ロットの高低変位推移例

表5 各クラスタのケース数 ※ ()内はロット数を表す

クラスタ	個数	異常発生ロットの分類結果
1	6	軌道変位大ロット(4), 軌道変位進み大ロット(1)
2	27	軌道変位大ロット(5), 著大値発生ロット(1)
3	19	
4	116	
5	332	

ていた。一方、クラスタ2には「著大値発生ロット」のように、軌道変位が落ち着いている期間があるものの、時々急進が生じる傾向があるロットが多く分類された。

以上の検証の結果、実際に大きな高低変位や急進が生じた保守管理に注意を要すべきロットは、全てクラスタ1またはクラスタ2に分類された。よって、構築した軌道変位異常箇所検知法により、保守管理に注意すべきロットを分類することは可能であることが確認できた。

4. 軌道変位異常箇所検知法による軌道管理

クラスタ分析に基づく軌道変位異常箇所検知法による軌道管理を検討するにあたり、表6に各クラスタの特徴を示す。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」の特徴を持つクラスタとしてグループ化することができ、クラスタ番号が小さいほど軌道状態推移に気を付けるべきロットが分類されていると考えられる。以上のことから、軌道検測の都度、本手法を適用し、「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特に注意して確認することで、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。

5. まとめ

本研究では、高低変位の履歴データをクラスタ分析することで、急進等に伴う大きな高低変位の発生可能性を把握する手法の構築と、これに基づく軌道管理法を提案した。得られた知見および今後の課題を以下に示す。

- (1) 軌道変位異常の検知法を開発するために、軌道変位の履歴データに対してクラスタ分析を行い、大きな軌道変位の発生可能性が高い箇所を抽出する軌道変位異常箇所検知法を提案した。
- (2) 本分析線区の全ロットと軌道構造や運転・線形条件等の割合が同程度になるように500ロット選定し、それらのロットを5つのクラスタに分類して本手法を適用した結果、軌道変位の異常が発生しやすいうロットを適切に分類できた。

表6 各クラスタの特徴

クラスタ	特徴
1	要注意ロット
2	準要注意ロット
3	注意ロット
4	安定推移ロット
5	極安定推移ロット

- (3) 分類したクラスタ別に、大きな軌道変位の発生可能性を考慮した管理法を提案した。「要注意」、「準要注意」、「注意」に分類された箇所について、巡回等で軌道変位や材料状態の変化を特に注意して確認することは、管理値を超える軌道変位の発生や事後保守の防止に有効と考えられる。
- (4) しかし本手法は、軌道検測の都度クラスタ分析を行う必要があるため、データ処理に労力を要する。また、本分析の対象線区とは異なり、軌道検測を高頻度には行っていない線区へ本手法を適用することも考えられる。よって、今後の課題として、入力する履歴データの期間や検測頻度を低減させた場合の異常検知精度に関する検証を行う必要がある。

文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準（軌道編）の手引き，pp.9-110，2007
- 2) 木村寛淳，田中博文，下野勇希：バラスト軌道における高低変位進み急進箇所の検出手法，第16回鉄道技術連合シンポジウム，2009
- 3) 三和雅史，石川達也，大山達雄：軌道状態推移予測モデルの構築と最適軌道保守計画作成のための全整数型数理計画モデル分析，土木学会論文集，No.681，IV-52，pp.51-65，2001
- 4) 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，pp.13-18，2012
- 5) 坪川洋友，矢澤英治，小木曾清高，南木聡明：車体装架型慣性正軌道検測装置の開発，鉄道総研報告，Vol.26，No.2，pp.7-12，2012
- 6) 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徴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論文集，No.2，pp.9-16，2017
- 7) 松本麻美，三和雅史，大山達雄：クラスタ分析法を用いた軌道変位異常箇所検知モデルの実証分析，AI・データサイエンス論文集，Vol.2，No.J2，pp.67-78，2021
- 8) 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