

## 線区特性の定量的評価および 軌道保守の投資資源配分手法の検討

松本 麻美\* 森 健矢\*\* 齊藤 大樹\*  
昆野 修平\*\* 坪川 洋友\*

### Quantitative Evaluation of Track Characteristics and Optimization of Resource Allocation for Maintenance

Mami MATSUMOTO Kenya MORI Daiki SAITO  
Shuhei KONNO Yousuke TSUBOKAWA

Sustainable management of railway tracks requires an effective investment plan for allocating limited resources to ensure future infrastructure availability. In order to achieve this, it is necessary to quantify the track characteristics, establish the target maintenance level for track irregularity based on these characteristics, and develop an economical track maintenance plan. By applying principal component analysis, we develop a method that quantitatively evaluates the track characteristics based on various influencing factors, which are verified using data on a railway operator. We develop a “track maintenance condition simulation tool” to determine target maintenance levels and optimize the allocation of investment resources based on the track characteristics and the predicted track irregularity values. Using this tool, we evaluate the relationship between the target maintenance levels and investment resources through a scenario analysis.

キーワード：多変量解析，軌道改良，軌道保守，投資配分，中長期計画，シミュレーション

### 1. はじめに

近年，少子高齢化や労働人口の減少を踏まえて，より効果的な軌道保守が求められている。しかし，軌道保守の効率性は線区により異なっており，保守費等のリソース投入の効果にも差が生じているのが現状である。

例えば JR では一般に，軌道変位の保守管理値等は線路等級に応じて定められており，これがリソース配分の目安にもなっている。この線路等級は旧国鉄時代において，列車の速度・本数，車両性能や保守経済性等を基に各線区を数段階の等級に分類したものであり，現在も多くの JR において継承されている。しかし，線路等級は頻繁に見直しながされるものではないため，設定当初と現在の線区の状況が異なる場合がある。また，同じ等級に分類されている線区であっても，その特性には違いがあることから，リソースを各線区に適正に配分するためには，線路等級を参考にしつつも，現状に即した線区ごとの収益構造等を定量的に評価する必要があると考えられる。

以上のことから本研究では，実在する複数の線区における営業収益率や軌道環境に関する変数を用いて，多変量解析手法のうち主成分分析を応用し，線区における様々な実態を踏まえた特性を定量的に評価する手法を開発した<sup>1)</sup>。また，軌道の保守管理レベルを検討する際には，その保守管理レベルを達成もしくは維持するために必要なリソース投入量をあわせて検討できるのが望ましい。そこで，軌道検測や保守実績の履歴データを分析し，中長期的な軌道状態の推移を予測する軌道状態シミュレーションツールを開発し

\* 軌道技術研究部 軌道管理研究室

\*\* 元 軌道技術研究部 軌道管理研究室

た。さらに、実際の線区に開発したツールを適用して、軌道の保守管理レベルに応じた投入リソースを検討するためのシナリオ分析を行った<sup>2)</sup>。

## 2. 線区特性の定量評価の重要性と分析線区

線区における軌道の保守費の投入効果の差を表す例として、図1に同じ線路等級の2つの線区の保守費と高低変位標準偏差の7年間の推移を示す。保守費と高低変位のいずれも、線区Iの1年目を1とした相対値で表す。ここで高低変位とは、列車が走行することによるまくらぎの沈下などにより発生するレール長手方向のレールの相対変位で、上下の歪みの大きさを表す指標であり、一般的に10mの弦の両端をレールにあててその中央部におけるレールと弦の離れによって測定される。この高低変位は、車両走行時の快適性や安全性に影響を及ぼし、線区を評価するための指標に用いられることが多い。図1において、線区I(年間通過トン数:250万t/年)と線区II(200万t/年)の高低変位は、両線区とも線区Iの1年目の0.9~1.2倍の範囲で推移しており、軌道状態は同程度である。一方、保守費に関しては、線区Iでは一定または微減傾向で高低変位の状態を維持しているのに対し、線区IIの1年目は線区Iの0.7倍程度であったにも関わらず、6年後には1.9倍にまで増加している。このように、同程度の高低変位であっても、線区ごとに保守費には大きな差がみられることから、様々な要素を考慮して各線区の特性を定量的に評価した結果に基づいて、限られたリソースを有効に配分することが求められる。

本研究では、実在するA~Tの20線区を分析対象とし、事業者における線路等級の分類を参考に、高規格の線区から順に上・中・下級線の3段階に分類した。これら20線区に対して、表1に示す項目をそれぞれ算出し、それらを変数として主成分分析を行った。なお、建設工事費(以下、「建費」と記す。)と保守費については、軌道状態に影響を及ぼす工種に要した費用のみを対象とした。具体的には、建費はロングレール化やPCまくらぎ化等の資本的支出に関する費用、保守費は道床つき固めや各種軌道材料交換など、原状回復を目的とした修繕費を対象としている。

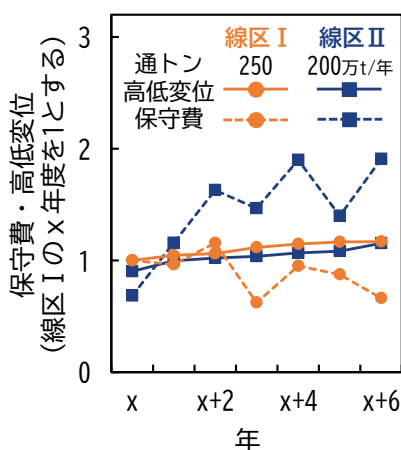


図1 保守費と高低変位の推移例

表1 主成分分析に用いた変数

No	項目	単位	備考
1	軌道延長	km	当該線区の本線軌道延長
2	営業収益率	円/km	(営業収益)/(軌道延長)
3	営業係数	-	100円の運輸収入を得るのに要する営業費
4	平均通過人員	人/日	1日1kmあたりの平均輸送量
5	PCまくらぎ化率	-	(PCまくらぎ延長)/(軌道延長)
6	ロングレール化率	-	(ロングレール延長)/(軌道延長)
7	無道床化率	-	(無道床延長)/(軌道延長)
8	曲線率	-	(緩和曲線を含む曲線延長)/(軌道延長)
9	建費率	円/km	(X年度の合計建費)/(軌道延長)
10	保守費率	円/km	(X年度の合計保守費)/(軌道延長)
11	軌道変位	mm	X+1年度の高低変位の100mロット平均σ値
12	通過トン数	百万t/年	年間通過トン数
13	貨物走行	-	貨物走行有り:1,無し:0

## 3. 主成分分析による線区特性の定量評価

主成分分析とは、多数の量的変数を合成し、より少ない合成変数である主成分に要約する手法である。また、単純に複数の変数を足し合わせるのではなく、適切な重みを付けたうえで足し合わせる点が特徴である。

これにより、データが持つ情報をできる限り損なわずに、データ全体の特性を可視化することができる<sup>3)4)</sup>。

表1に示す13変数を線区毎に算出した結果を用いて分析した結果、主成分が持つ情報量の比率である寄与率は、第1主成分は33%、第2主成分は25%、第3主成分は16%となった。よって、これら3つの主成分により全体の74%の説明能力を持っているとすることができる。ただし、第3主成分の寄与率は2割を下回る程度であることから、十分な説明能力を持つとは言い難い。

図2に、各変数の第1主成分と第2主成分に対する重みの分布を示す。この分布は、主成分を構成する変数の関係性を直感的に理解するためのものである。第1主成分においては、貨物走行、ロングレール化率、年間通トン、営業収益率、平均通過人員が正の相関を示し、営業係数や高低変位は負の相関を示しており、第2主成分においてはPCまくらぎ化率や建費率が正の相関、曲線率と高低変位が負の相関を示している。これより第1主成分は、収益や輸送量等が大きい線区ほど、ロングレール化率および無道床率が高く、営業係数や高低変位は小さくなる傾向にあり、線区の総合的な営業状態を表していると解釈することができる。次に第2主成分は、建費を投入して軌道改良が進んでいる線区ほど、また曲線が少ない線区ほど、高低変位が小さくなる傾向にあり、線区の総合的な軌道状態を表していると解釈できる。

図3に、A~Tの20線区における第1主成分と第2主成分に対する得点の分布を示す。これは、各線区に割り当てられた主成分得点を、第1主成分と第2主成分による二次元平面上にプロットした散布図である。この図により、各線区の位置づけを把握することが可能となる。横軸は第1主成分、すなわち線区の総合的な営業状態を表す指標であるため、図の右側に位置する線区ほど収益が多く営業状態が良好であると評価され、一方左側に位置する線区ほど営業状態が悪いと評価される。また、縦軸の第2主成分は線区の総合的な軌道状態を表す指標であることから、上に位置する線区ほどPCまくらぎ化が進んでいて高低変位が小さく、下に位置する線区ほど高低変位が大きい傾向がある。ここで、第2主成分の下方に下級線が多く分布していることから、本分析が線区の特徴を適切に表していると考えられる。

さらに詳細を考察すると、例えば線区Aは、上級線の中では比較的PCまくらぎ化率が低いものの、平均通過人員や営業収益率が高く、営業状態の良好な線区であると評価できる。一方、下級線である線区Oは、営業状態は良くないが、PCまくらぎ化率が高く、軌道状態は良好である。対照的に、同じく下級線の線区Tは、営業状態が悪く、主に木まくらぎで構成されている線区でありPCまくらぎ化率は0に近く、軌道状態も劣っている線区である。例えば軌道保守費などの限られたリソースを、営業状態を考慮して配分する必要がある場合、線区Oのように図の左上(第2象限)に位置する線区は、軌道保守量の見直しなどの方針策定が可能となる。以上より、主成分分析を用いることで、線区の特徴を簡易に分類し、営業状態および軌道状態の定量的な比較や評価を行うことが可能であると考えられる。

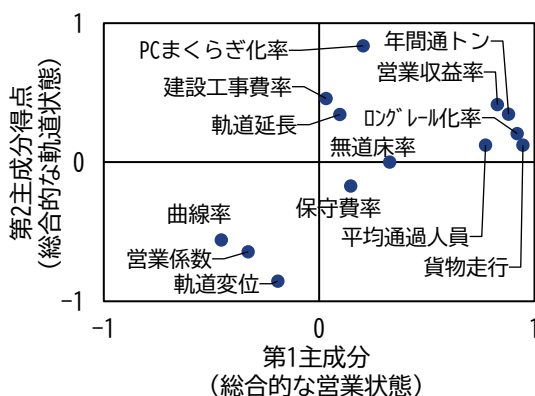


図2 各変数の主成分に対する重みの分布

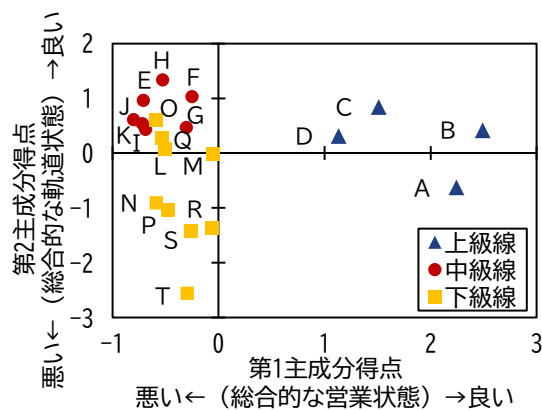


図3 各線区の主成分に対する得点の分布

## 4. 将来予測に基づく線区に応じた中長期計画の策定

軌道の保守管理レベルを検討する際には、そのレベルを達成または維持するために必要なリソース投入量を併せて検討し、経済性を考慮した投資判断を行う必要がある。投資判断にあたって中長期的な軌道状態を分析するため、「軌道状態シミュレーションツール」を開発した。開発にあたっては、軌道検測や保守実績の履歴データを用いて、ある一定期間に生じる高低変位の変化である高低変位進みが、道床交換とロングレール化によって改善する効果を分析した。本ツールは、その効果を反映して将来の高低変位を予測する機能を有するものである。本章では、本ツールの開発と、実際の線区に本ツールを適用してシナリオ分析を行い、軌道の保守管理レベルと投入リソースの関係を検討した結果について述べる。

### 4.1 道床交換およびロングレール化による高低変位および高低変位進みの改善効果

本節では、高低変位および保守実績の履歴データを用いて、実線区における道床交換やロングレール化による高低変位進みの改善効果を分析する。分析対象期間は2017年度から2020年度までとし、分析単位は軌道を25mで区切ったロットとし、各ロット延長における高低変位の標準偏差(σ)を指標として用いた。道床交換についてはロット内で10m以上の施工が実施されたデータを、ロングレール化についてはロット全長で施工が実施されたデータを分析対象とした。

図4に、道床交換とロングレール化が施工された箇所における高低変位σの改善量を、図5に高低変位σ進みの改善量を示す。なお、本章における改善量とは、保守前と保守後の高低変位σおよび高低変位σ進

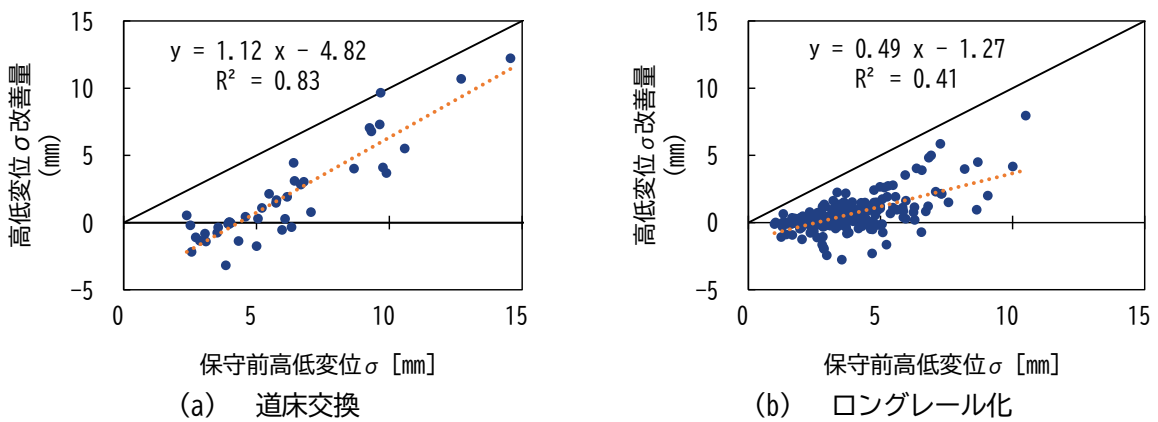


図4 高低変位σの改善量

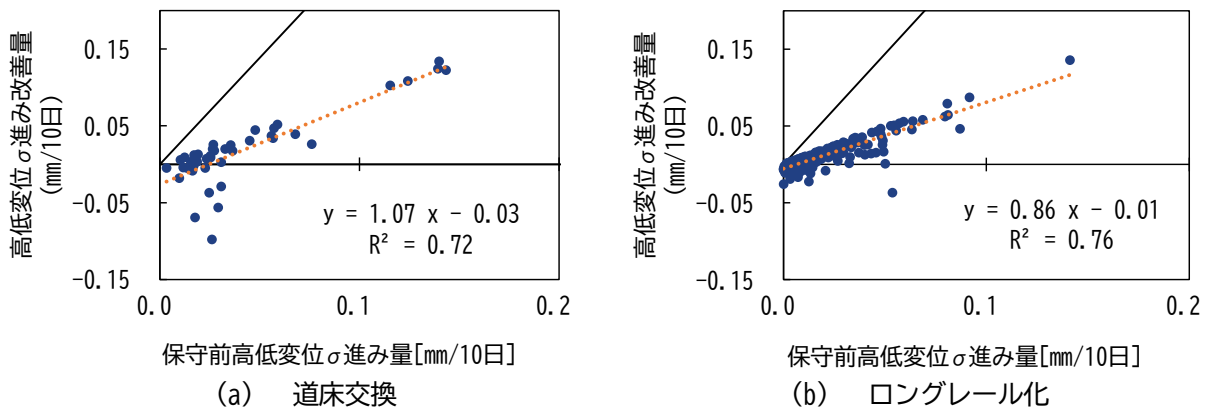


図5 高低変位σ進みの改善量

みの差分とする。図4(a)より、道床交換においては保守前の高低変位 $\sigma$ と高低変位 $\sigma$ 改善量は比例関係にあり、高低変位 $\sigma$ が大きいほど改善効果も大きいことが確認できる。一方図4(b)より、ロングレール化においてはその効果は限定的である。これは、道床交換時には道床のつき固めにより高低変位 $\sigma$ が整正される一方で、ロングレール化時にはつき固めが必ずしも実施されないためであると考えられる。図5より高低変位 $\sigma$ 進みに関しては、道床交換・ロングレール化共に保守前の高低変位 $\sigma$ 進みと改善量に明確な比例関係が見られ、両者の効果は概ね同等であることが確認できる。なお、道床交換後に高低変位 $\sigma$ 進みが悪化しているロットについては、初期沈下の影響がある可能性が考えられる。以上より、道床交換およびロングレール化における高低変位 $\sigma$ と高低変位 $\sigma$ 進みの改善効果を定量的に評価可能であることが確認できた。

#### 4.2 軌道状態シミュレーションツールの開発

図6に、開発した軌道状態シミュレーションツールの処理フローを示す。本ツールは、軌道検測の履歴データと軌道保守・改良の中長期計画（投入リソース）を入力データとし、軌道を任意の一定長で区切ったロットを計算単位として各ロットにおける高低変位 $\sigma$ の時間推移を計算するものである。本ツールの処理概要を以下に示す。

- ① 軌道検測の履歴データから、指数平滑法により各ロットの計算開始時の高低変位 $\sigma$ と高低変位 $\sigma$ 進みを計算する<sup>5)</sup>。
- ② 年度初の高低変位 $\sigma$ を計算する。
- ③ 軌道保守・改良工事を実施しない場合の年度末の高低変位 $\sigma$ を計算する。

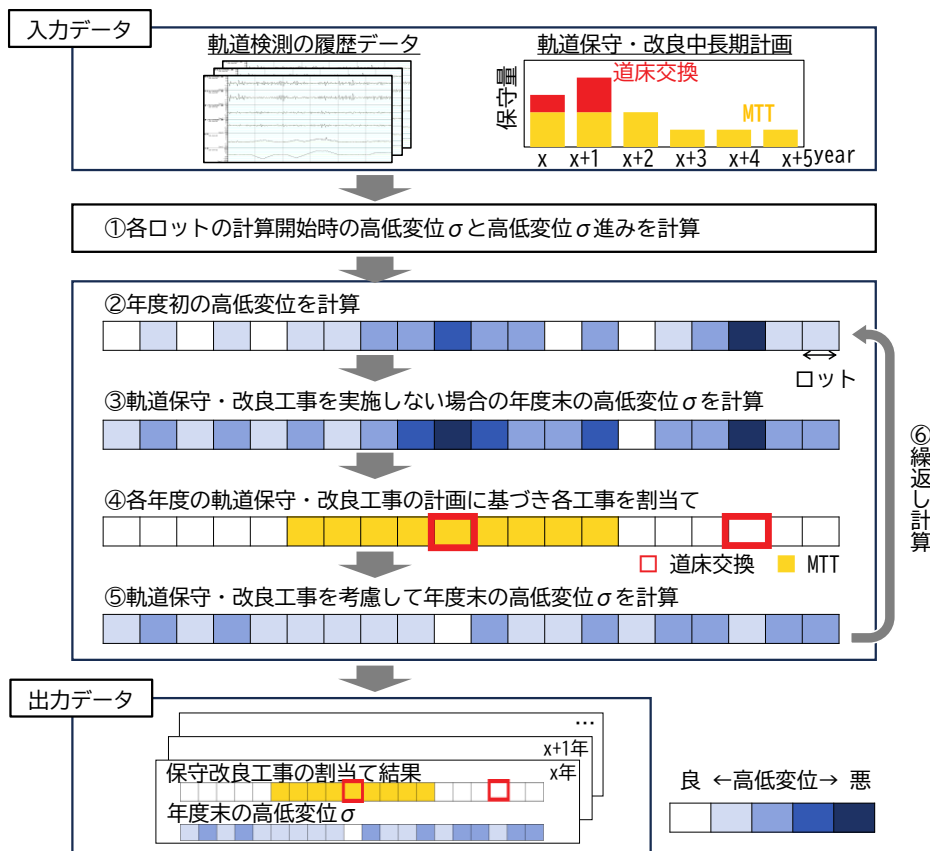


図6 軌道状態シミュレーションツールの処理フロー

- ④ 各年度の軌道保守・改良工事の計画に基づき各工事をロットに割当てる。軌道保守工事はマルチプルタ イタンパ（以下、「MTT」と記す。）によるつき固めを、軌道改良工事は高低変位 $\sigma$ 進みの改善効果が期待できる道床交換とロングレール化を想定し、前節で分析した結果を用いる。道床交換については、高低変位 $\sigma$ 進みが大きいロットから順に施工が行われるものとし、ロングレール化については各年度であらかじめ定めた施工区間で実施するものとする。
  - ⑤ 軌道保守・改良工事を考慮して年度末の高低変位 $\sigma$ を計算する。軌道保守工事が行われたロットでは、高低変位 $\sigma$ の改善量と、高低変位 $\sigma$ 進みの改善量を考慮する。軌道保守工事をを行うロットは年度末時点の軌道状態予測結果に基づいて選定され、保守による高低変位 $\sigma$ の改善量を考慮する。
  - ⑥ この処理を複数年度にわたって繰り返し計算する。
- 以上により、中長期的な高低変位 $\sigma$ の推移と保守計画の策定が可能となる。

### 4.3 シナリオ分析によるリソース投入計画の検討

本節では、高低変位 $\sigma$ を軌道状態の指標とし、軌道状態シミュレーションツールを用いたシナリオ分析により、上級線と下級線における保守管理レベルとそれを達成するための中長期的な軌道保守計画を検討した。分析対象線区は、上級線は図3における線区A、下級線は線区Oを含む線区とする。なお、検討にあたってのロット長は25mとし、駅構内や踏切等の構造物が介在するロットは分析対象外とした。また、予測期間は2023～2042年度の20年間とした。

#### 4.3.1 上級線におけるシナリオ分析結果

本線区は、上級線としてすでにロングレール化がほぼ完了しているため、ロングレール化は計画しないものとし、MTTおよび道床交換の計画については、過去の施工実績を参考に施工延長を設定した。図7に対象線区において設定したシナリオと、そのシナリオに基づき軌道状態シミュレーションツールを用いて将来の高低変位 $\sigma$ を予測した結果を実績値と共に示す。まず、MTTと道床交換を現状と同程度の施工延長としたシナリオA1については、予測された高低変位 $\sigma$ の線区平均値が2.38～2.47mmの間で推移しており、これは2022年度までの実測値と同程度と判断できることから、本ツールが一定の予測精度を有していることが確認できる。続いて、道床交換を実施しないシナリオA2については、2042年度末の高低変位 $\sigma$ の線区平均値が3.13mmとなり、2022年度末の実測値2.39mmに対して、0.76mm悪化する結果となった。一方で、道床交換の施工延長を現状の2倍とするシナリオA3と、MTTの施工延長を現状の1.3倍とするシナリオA4については、2042年度末の高低変位 $\sigma$ の線区平均値が、ともに1.97mmとなり、2022年度末の実測値に対して0.42mm良化する結果となった。すなわち、シナリオA3とA4は、例えば対象線区の目標とする高低変位 $\sigma$ の線区平均値である目標保守管理レベルを他の上級線と同等の2.00mmに向上させることを考える場合、それを達成するための具体的な施工計画と解釈することができる。

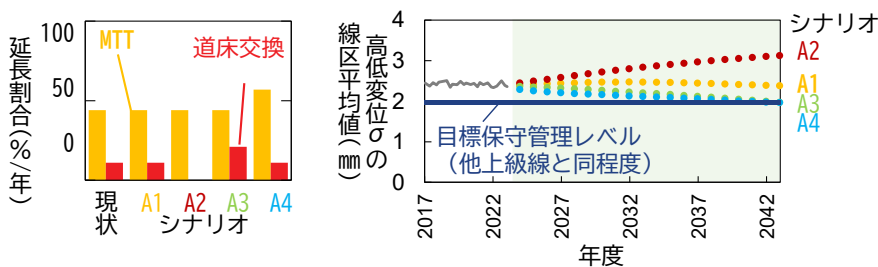


図7 シナリオ分析結果（上級線）

### 4.3.2 下級線におけるシナリオ分析結果

本線区は、図3の線区Oを含む線区であることから、下級線の中では軌道状態が良いが、継目落ちによる高頻度保守区間が多く含まれる。道床状態は良好とはいえないものの顕著な悪化傾向も見られず、道床交換の実績はほぼない。そのため本検討においては、継目落ち対策に着目し、MTTと継目落ち対策工の施工量に関して、複数のシナリオを設定した。継目落ち対策工については、ロングレール化と同様に、各年度の施工区間を入力データとして与えることで表現した。ただし、下級線において上級線と同様の施工方法でロングレール化が実施される可能性は低いと考え、継目落ち対策工の高低変位 $\sigma$ 進みの改善効果は、ロングレール化の8割とした。なお、具体的な継目落ち対策工としては、路盤改良<sup>6)</sup>や低強度安定処理工<sup>7)</sup>が考えられる。ここで、継目落ち対策工の施工区間には、現状の高頻度保守箇所を選定するのが適切と考えられる。そこで、MTTを現状と同程度の施工延長とするシナリオB1の計算を行い、予測期間(2023~2042年度の20年間)のうち15回以上MTTが割当てられたロットを継目落ち対策工の施工対象とした。また、継目落ち対策工の施工期間は2023~2027年度の5年間とした。

軌道状態シミュレーションツールを用いて、高低変位 $\sigma$ の線区平均値の推移を予測した結果を、図8に示す。MTTを現状と同程度の施工延長としたシナリオB1については、予測された高低変位 $\sigma$ の線区平均値の推移は若干悪化傾向にあるが、実測値の推移と概ね同等であることが確認できる。MTTの施工延長を現状の5割とするシナリオB2は、2042年度末の高低変位 $\sigma$ の線区平均値が5.64mmであり、2022年度末の実測値4.02mmに対して1.62mm悪化するが、20年後においても他の下級線の高低変位 $\sigma$ の線区平均値(6.00mm程度)には達しない結果となった。MTTの施工延長を他の下級線と同等としたシナリオB3は、2042年度末の高低変位 $\sigma$ の線区平均値が6.53mmであり、予測開始時から15年程度で他の下級線と同等の軌道状態となる結果となった。MTTの施工延長を他の下級線と同等とし、継ぎ目落ち対策工の実施を想定したシナリオB4については、2042年度末の高低変位 $\sigma$ の線区平均値が6.09mmとなり、予測開始時から19年程度で他の下級線と同等の軌道状態となる結果となった。つまり、他の下級線の保守管理レベルを当線区の目標保守管理レベルとする場合、シナリオB4が当面の具体的な施工計画と解釈することができる。

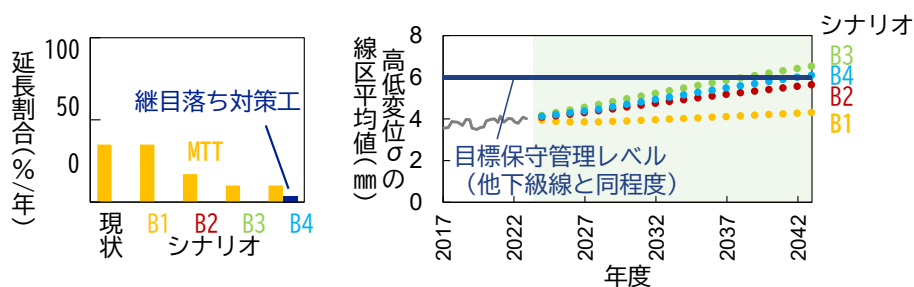


図8 シナリオ分析結果(下級線)

## 5. まとめ

本研究では、少子高齢化や労働人口の減少を背景に、限られたリソースを有効に活用した軌道保守のあり方について検討した。本検討で得られた知見を以下に示す。

- 線区ごとの収益構造や軌道状態を定量的に評価する必要性を示した。次に、20線区における高低変位データや軌道構造、通過トン数、各種コスト等を変数として主成分分析を行い、営業状態および軌道状態を軸とした特徴分類により、線区の特性を定量的に評価する手法を提案した。

- ・ 道床交換やロングレール化による高低変位および高低変位進みの改善効果を履歴データから分析し、それを踏まえて中長期的な軌道状態の推移を予測するシミュレーションツールを開発した。
- ・ 開発した軌道状態シミュレーションツールを実線区へ適用し、線区の特성에応じて目標とする保守管理レベルを達成するための具体的な中長期計画の策定が可能であることを示した。

これらの成果は、軌道の維持管理にあたってのリソース配分の最適化を進めるうえで有効な手がかりとなり、持続可能な鉄道インフラの維持管理に向けた検討に寄与することが期待される。

## 文 献

- 1) 松本麻美, 斎藤大樹, 坪川洋友: 主成分分析を用いた線区特性の評価手法, 令和6年度土木学会全国大会 第79回年次学術講演会, VI-679, 2024
- 2) 森健矢, 昆野修平, 松本麻美, 坪川洋友: 軌道状態の中長期的な将来予測に基づく線区に応じた保守管理レベルの検討, 令和6年度土木学会全国大会 第79回年次学術講演会, VI-678, 2024
- 3) 永田靖, 棟近雅彦: 多変量解析法入門, サイエンス社, 2001
- 4) 村瀬洋一他: SPSSによる多変量解析, オーム社, 2007
- 5) 三和雅史, 大山達雄: 最適軌道保守計画作成モデルの実施検証に基づく性能評価と運用実施の汎用化, 土木学会論文集 D3, Vol.69, No.2, pp.160-175, 2013
- 6) 鉄道総合技術研究所: 営業線における軌道・路盤の補修・改良方法の手引き, 2017
- 7) 中村貴久, 景山隆弘: 劣化した道床バラストの性能を回復する, RRR, Vol.79, No.7, pp.20-25, 2022