

# 在来線におけるつき固めとレール削正の 組み合わせ保守効果の検証と計画システムへの適用

昆野 修平\* 松本 麻美\* 森 健矢\*

## Field Verification of Combining Ballast Tamping and Rail Grinding and Application to Planning System

Shuhei KONNO Mami MATSUMOTO Kenya MORI

In ballasted tracks, track irregularity and rail surface irregularity gradually increase due to the load of repeated train running. To repair these irregularities, ballast tamping or rail grinding are performed as the general maintenance work. This paper verifies effect of combining these two types of track maintenance to reduce a speed of track deterioration. Furthermore, extending the previously developed combined maintenance planning system, the authors simulate maintenance plans considering the effect of combined maintenance.

キーワード：軌道保守，レール削正，軌道変位進み，軸箱加速度，組み合わせ保守計画システム

## 1. はじめに

バラスト軌道は、敷設が容易で経済性に優れている一方、列車が繰り返し通過することによって軌道形状や構成する材料は徐々に劣化していく。その劣化の中でも列車の乗り心地や走行安全性に大きな影響を与えるのが、レール表面にできる微細なレール凹凸と、繰り返しかかる列車荷重によりバラスト層が変形して軌道が正規の位置から徐々に変位することで生じる軌道変位である。このため鉄道事業者は、一般に、前者についてはレール削正車によりレール表面を削正して除去し、後者についてはマルチプルタイタンバ（MTT）によりバラストをつき固めて小さくする（軌道変位保守）。レール削正や軌道変位保守の作業にかかる経費は大きいいため、これら保守作業を効率的に計画・実施して経費削減することは鉄道事業者にとって重要な課題の一つである。

軌道保守計画の効率化に関する既往の研究として、軌道変位データから将来の軌道変位を予測して最適な軌道変位保守計画を作成するモデルが考案され、本モデルに基づいて、MTTやレール削正車の最適な運用計画を作成するシステム<sup>1) 2)</sup>が開発されている。また、軌道変位保守とレール削正を組み合わせると同時に実施すること（以下、「組み合わせ保守」という。）で、組み合わせ保守後の高低変位進みが組み合わせ保守前に比べて抑制されることがわかっている<sup>3)</sup>。組み合わせ保守を行うことで、軌道変位の保守周期が延伸され、軌道保守頻度を削減できると考えられることから、MTTとレール削正車の組み合わせ保守計画を作成するシステム<sup>4)</sup>も考案され

ている。しかしながら、これらの検討は新幹線を対象としたものであり、年間通トンやMTT保守及びレール削正の施工延長が異なる在来線において組み合わせ保守の効果は明らかにされていなかった。

そこで本研究では、在来線における組み合わせ保守の適用に向けて試験施工を行い、高低変位進みの抑制効果を検証した。さらに、既存の組み合わせ保守計画システムに対して在来線に適した入力パラメータを検討し、在来線においても組み合わせ保守計画を容易に作成できるようにした。そして、本システムを用いた在来線における組み合わせ保守計画の試算を行った<sup>5)</sup>ので、その結果を紹介する。

## 2. 在来線における組み合わせ保守効果の検証

### 2.1 試験区間の選定

在来線の複数区間で組み合わせ保守の試験施工を行い、レール凹凸の発生状況、およびレール削正によるレール凹凸改善状態を調査し、在来線における組み合わせ保守による高低変位進み抑制の効果を検証した。なお、本論文で示すレール凹凸および軸箱加速度は、対象とする線区で発生している内軌波状摩耗に起因するレール凹凸の波長帯域でバンドパスフィルタ処理（以下、「BPF処理」という。）したものである。

試験区間の選定にあたっては、新幹線で活用されている組み合わせ保守候補箇所の選定モデル<sup>4)</sup>を参考に、在来線向けの条件を設定した。表1に、在来線向けの組み合わせ保守候補箇所選定条件を示す。これら3つの条件をすべて満たす箇所を組み合わせ保守候補箇所として選定する。各条件の考え方は次の通りである。

\* 軌道技術研究部 軌道管理研究室

表 1 在来線における組み合わせ保守候補条件

| 条件 | 目的             | 項目                | 閾値                    |                         |
|----|----------------|-------------------|-----------------------|-------------------------|
|    |                |                   | 在来線                   | 新幹線                     |
| ①  | MTT投入目安        | 10m弦高低変位 (標準偏差)   | 4.3mm 以上              | 1.1mm以上                 |
| ②  | レール削正目安        | 軸箱加速度 (標準偏差)      | 25m/s <sup>2</sup> 以上 | 0.7 m/s <sup>2</sup> 以上 |
| ③  | 道床状態等の良好な区間を判定 | 5m弦高低変位 (標準偏差)    | 4.0mm以下               | 1.5mm以下                 |
|    |                | 5m弦高低変位検測差 (標準偏差) | 0.6mm以下               | -                       |
|    |                | 5m弦高低変位 (最大値)     | 7.0mm以下               | 4.0mm以下                 |

表 2 組み合わせ保守効果検証のための試験区間

| 区間 | 単線/複線 | 通過トン数 (万t/年) | 施工延長 (m) | 曲線半径 (m) | 組み合わせ保守 間隔(日) | レール 凹凸測定 |
|----|-------|--------------|----------|----------|---------------|----------|
| A  | 単     | 630          | 880      | 300      | 113           | 実施       |
| B  | 単     | 630          | 225      | 400      | 124           | 実施       |
| C  | 複     | 840          | 134      | 500      | 92            | 実施       |
| D  | 単     | 630          | 400      | 300      | 93            | 未実施      |

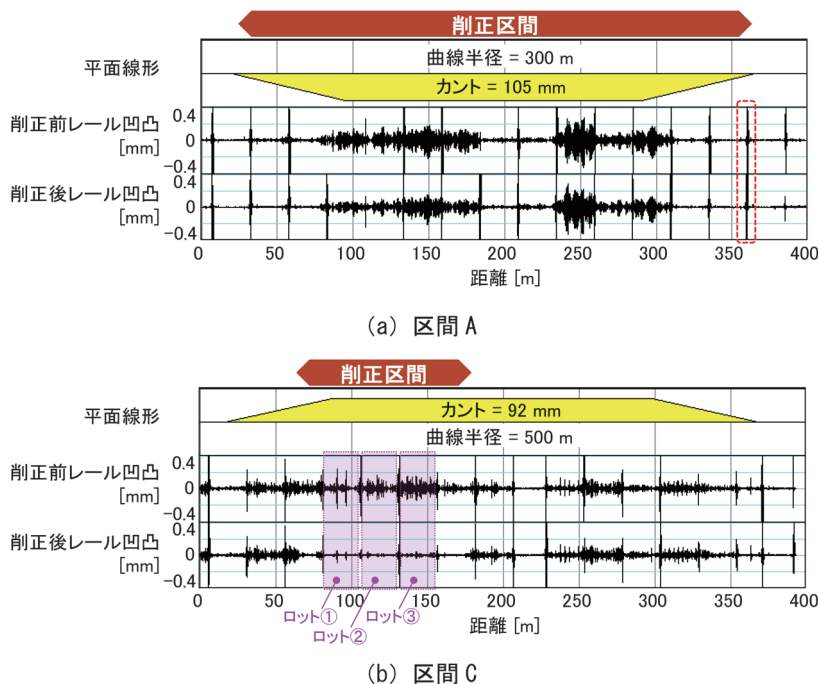


図 1 試験区間における削正前後のレール凹凸

条件①では、高低変位が小さな箇所にも MTT 保守を行っても高低変位の改善効果を得難いため、年度内に高低変位が整備目標値等の閾値を超えると予測される箇所を抽出する。条件②では、レール凹凸との相関が高く、車上で連続測定可能な軸箱加速度を指標に、レール削正による凹凸改善効果が得られる可能性の高い箇所を選択する。条件③は、道床状態が悪い箇所については組み合わせ保守を行っても軌道変位の十分な改善を期待できないことから、既往の研究<sup>6)</sup>より道床状態を評価するのに適すと考えられる 5m 弦高低変位を指標とする。

なお、10m 弦高低変位 (条件①) や軸箱加速度 (条件②) に関する閾値は、試験線区において MTT やレール削正車の投入目安となる値とした。そのため、新幹線の閾値と比較して大きい値となっている。

表 2 に、以上の条件を踏まえて選定した組み合わせ保守候補箇所の中から、さらに MTT やレール削正車の稼働状況を加味して選定した試験区間の詳細を示す。なお、いずれの区間も 25m の定尺レール区間であり、MTT 保守がレール削正よりも先に行われた。試験区間は全て同一の線区から選定したが、区間 C のみ複線区間であるため年間通過トン数が異なる。表中の「施工延長」は組

み合わせ保守の施工延長を表す。「組み合わせ保守間隔」は、MTT 保守からレール削正施工までの日数である。

## 2.2 レール削正における凹凸除去効果の調査

レール削正による凹凸除去の実態を確認するため、表 2 に示した試験区間 A~C において、レール凹凸連続測定装置<sup>7)</sup>でレール削正前後のレール凹凸量を測定した。

図 1 に、区間 A および区間 C の曲線内軌における削正前後のレール凹凸を示す。図 1(a) より、区間 A では削正後のレール凹凸の振幅がほとんど減少していないが、これはパス数が不足していたためと考えられる。なお、パス数とは、一度の施工において砥石で削りながらレール削正車が通過する回数のことをいう。一方、図 1(b) より、区間 C ではレール削正前に比べて、削正後のレール凹凸の振幅が大きく減少していることから、十分なパス数のレール削正によりレール凹凸が改善したことがわかる。

そこで、区間 C において、レール削正時のパス数とレール凹凸の関係を調べる。レール凹凸の評価には、平均レール凹凸を用いる。これは、理想的な正弦波と仮定したレール凹凸波形の全振幅を、一定区間におけ

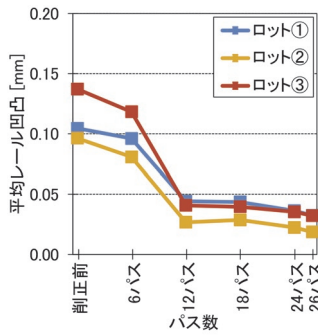


図2 レール削正によるレール凹凸の推移

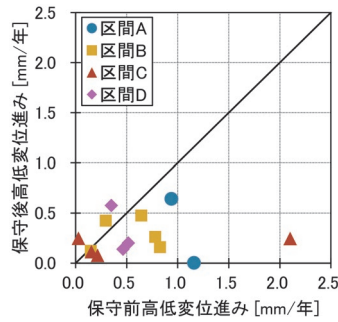


図3 組み合わせ保守前後の高低変位進みの分布

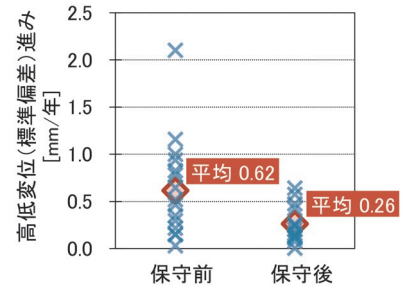


図4 組み合わせ保守前後の高低変位進みの比較

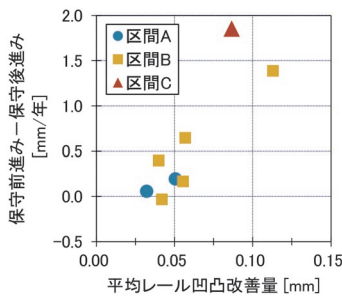


図5 レール削正によるレール凹凸改善量と組み合わせ保守効果の関係

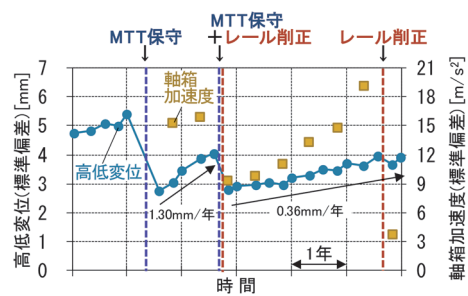


図6 組み合わせ保守箇所の高低変位と軸箱加速度の推移

るレール凹凸の標準偏差の $2\sqrt{2}$ 倍により算出したものである<sup>8)</sup>。なお、平均レール凹凸については、図1(a)中の赤の破線で囲った箇所のような、レール継目に起因する局所的に発生する大きな値の影響を除くため、継目部の前後1mを除いた25mロットで算出した。また本線区におけるレール削正は、SPENO社製の8頭式の削正車により行った。

図2に、図1(b)に示す区間Cのロット①～③におけるレール削正時のパス数と平均レール凹凸の関係を示す。同図より、本区間の全ロットにおいて、削正前は0.10～0.15mm程度の平均レール凹凸が生じていたが、7～12パス目で平均レール凹凸が大幅に低減され、12パス目以降の平均レール凹凸は横ばいで推移していることから、区間Cにおいては、12パスでレール凹凸を十分に除去することができたと考えられる。

### 2.3 高低変位進みの抑制効果の検証

図3、図4に、試験区間A～Dにおける組み合わせ保守前後の高低変位25mロット標準偏差の進みを示す。図3より、ほとんどのロットにおいて保守前に比べて保守後の高低変位進みが小さいことがわかる。また、保守前の高低変位進みによらず、保守後の高低変位進みは一定の値に収まっていることから、保守前の軌道変位進みが大きいほど保守前後の高低変位進みの差が大きく、高低変位進みの抑制効果が大きいと言える。図4より、保

守前の高低変位進みの全ロットの平均は0.62mm/年、保守後の平均は0.26mm/年であり、また最大値においても保守前は2.0mm/年以上であったが、組み合わせ保守後は0.7mm/年以下に落ち着いていることが確認できる。

図5に、試験区間A～Cの内軌におけるレール削正前後の平均レール凹凸の差（平均レール凹凸改善量）と、保守前後の高低変位進みの差の関係を示す。高低変位進みの差が組み合わせ保守による高低変位進みの抑制効果を表すことから、レール削正による平均レール凹凸改善量が大きいくほど、組み合わせ保守効果が大きくなる傾向がわかる。また同図より、図1(a)の区間Aのようにパス数が不足したことでレール凹凸改善量が小さい箇所は、組み合わせ保守効果も小さい傾向にあることがわかる。

図6に区間Dのある25mロットにおける高低変位と軸箱加速度の標準偏差の推移を表す。区間Dではレール凹凸測定を実施していないが、レール削正前後で軸箱加速度がおおよそ半減していることから、削正により一定のレール凹凸を除去できていると考えられる。同図より、MTT保守のみを施工した場合は、施工前後で高低変位の進みに大きな変化は見られないが、MTT保守とレール削正を同時期に組み合わせる施工した場合は、施工後の高低変位進みが施工前と比較して抑制されていることがわかる。またこの事例の場合、組み合わせ保守による高低変位進みの抑制効果は、少なくとも3年は持続していることがわかる。

以上の結果から、新幹線で得られていた知見と同様に、在来線においても、組み合わせ保守前の高低変位進みが大きく、またレール削正による凹凸改善量が大きいほど組み合わせ保守効果が得られるということがわかった。

### 3. 組み合わせ保守効果の推定モデル

#### 3.1 レール凹凸と軸箱加速度の関係

前述の通り、レール凹凸の効率的な把握手法として、車上から連続的に測定が可能な軸箱加速度の活用が知られている<sup>8)</sup>。そこで、本分析の対象線区における組み合わせ保守効果を推定するモデルを構築するため、軸箱加速度とレール凹凸の関係を確認した。

図7に、区間A～Cにおいて、レール凹凸連続測定装置により取得した平均レール凹凸と、軌道検測車の台車前軸で測定した軸箱加速度25mロット標準偏差の関係を示す。同図より、レール凹凸と軸箱加速度（標準偏差）は、相関係数0.963と強い相関があることが確認できる。なお、今回分析した区間の軌道検測車の走行速度は60～65 [km/h] の間で分布していた。既往の研究<sup>8)</sup>では、発生している波状摩耗の波長帯域に応じてBPF処理した台車前軸の軸箱加速度データは、曲線半径に応じた通常の走行速度幅（40～70km/h程度）で走行しているデータにおいて、レール凹凸に対する走行速度の影響が小さく、レール凹凸の評価に適していることが示されている。以上のことから、図7の関係を用いることで、構内等の低速走行区間を除いた区間に対してレール凹凸を軸箱加速度から推定することが可能であると考えられる。

#### 3.2 在来線における組み合わせ保守効果の推定モデル

新幹線においては、レール削正による軸箱加速度の改善量と、MTTとレール削正の施工順序・保守間隔を説明変数とした組み合わせ保守効果の推定モデルが提案されている<sup>4)</sup>。しかし、在来線においては、レール削正の施工量が新幹線に比べて非常に少ないことから、今回の検証では、施工順序・保守間隔に関する十分なデータが得られなかった。そこで、本検証で得られたデータを用いて、施工順序・保守間隔を説明変数としない在来線向けの組み合わせ保守効果の推定モデルを提案した。

前章の結果から、組み合わせ保守による高低変位進みの抑制効果には、図4に示した通り保守前の高低変位進み $\Delta\sigma_{\text{before}}$  [mm/年]と、図5に示した通りレール削正によるレール凹凸改善量が影響すると考えられる。さらに、3.1節よりレール凹凸と軸箱加速度は強い正の相関関係にあることから、これら指標の保守前後の差であるレール凹凸改善量と軸箱加速度改善量 $\alpha_{\text{imp}}$  [m/s<sup>2</sup>]も強い相関があると考えられる。これらの関係から、区間A～Dにおいて $\Delta\sigma_{\text{before}}$ と $\alpha_{\text{imp}}$ をパラメータとした回帰分析に

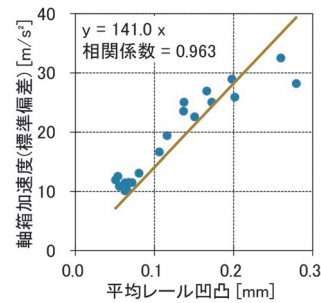


図7 軸箱加速度とレール凹凸の関係

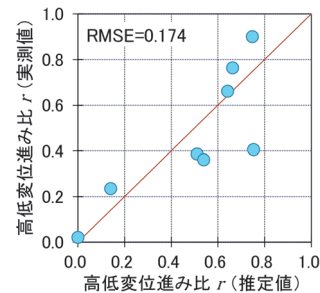


図8 高低変位進み比 $r$ の推定値と実測値の関係

より、組み合わせ保守前後の高低変位進み比 $r$ （保守後の高低変位進み／保守前の高低変位進み）の推定モデルを式(1)のように構築した。同式より、保守前の高低変位進みおよびレール削正による軸箱加速度の改善量が大きいほど、高低変位進み比 $r$ が小さくなり、組み合わせ保守効果が大きくなることがわかる。

$$r = 1 - 0.0205 \times \alpha_{\text{imp}} - 0.2682 \times \Delta\sigma_{\text{before}} \quad (1)$$

(ただし  $0 \leq r \leq 1$ )

本式の決定係数は0.945であったことから、回帰式の当てはまりはよく、高低変位進み比 $r$ の推定モデルとしては高い説明力を持っているといえる。

図8に、高低変位進み比 $r$ の推定値と実測値の関係を示す。同図において、推定値と実測値は近い値であることが確認でき、両者の差のRMSE（二乗平均平方根誤差）は0.174であった。

上記の式(1)は本分析の対象線区への適用を目的とした推定式であるが、別の線区においても以上に示した方法によって組み合わせ保守による高低変位進み比の推定モデルを構築できると考えられる。

## 4. 組み合わせ保守計画システム

### 4.1 組み合わせ保守計画システムの構成

組み合わせ保守計画システムでは、次の3つのシステムを連携させて、組み合わせ保守を考慮したレール削正

車と MTT の運用計画を容易に策定できる。まず一つ目は、軌道検測データから軌道状態を評価するための軌道状態評価システム (RCA : Railway Condition Analyzer)<sup>9)</sup>、二つ目は MTT 保守計画を作成する軌道保守計画システム (MTS : MTT Scheduler)<sup>1)</sup>、三つめはレール削正車の運用計画を作成するレール削正計画システム (RGS : Rail Grinding Scheduler)<sup>2)</sup> である。

図 9 に、組み合わせ保守計画システムの構成を示す。はじめに、軌道状態評価システムにより、組み合わせ保守の効果が見込める「組み合わせ保守候補箇所」を選定する。なおここでは、表 1 に示した通り、新幹線と在来線で異なるパラメータを用いる。次に、軌道保守計画システムにより、高低変位を指標として MTT の運用計画を作成する。この際、組み合わせ保守候補箇所は、計画期間内に MTT 保守が行われるように条件を設ける。最後に、レール削正計画システムにより、軸箱加速度を指標として入力して削正車の運用計画を作成する。ここでは、組み合わせ保守候補箇所において、MTT 保守時期の前後一定期間内にレール削正がなされるように計画する。以上により、MTT による軌道変位保守に加えて、レール削正車によるレール凹凸の除去、さらに組み合わせ保守効果による高低変位進み抑制の実現が期待できる。

## 4.2 システムによる組み合わせ保守計画の試算

### 4.2.1 試算条件

2章で示した組み合わせ保守候補条件 (表 1) や、3章で示した組み合わせ保守効果の推定結果を組み合わせ保守計画システムに反映して、3年分の組み合わせ保守を考慮した MTT とレール削正車の運用計画及び軌道状態予測の試算を行った。以下に本試算の条件を示す。

#### a) 対象線区と計画対象ロット数

表 2 に示した試験区間と同一の線区における、1つの管理エリアを対象とした。本エリアは単線区間であり、MTT とレール削正車はそれぞれ 1 台ずつ保有しているとした。計画作成時の最小距離単位となるロットの長さは 100m とし、対象エリアの総ロット数は 1,270 (127km 相当) である。このうち、分岐器や無道床区間、低速走行により軸箱加速度によるレール凹凸評価が不適な構内区間を含む 270 ロットを除いて計 1,000 ロットを計画対象とした。

#### b) 軌道検測データと軸箱加速度データ

軌道検測データと軸箱加速度データは、直近 3 年間のデータを用いた。対象線区の軌道検測車による測定は年 4 回、そのうち軸箱加速度を台車前軸で測定したデータは 2 回分である。良好なデータが得られていなかった軸箱加速度データ等を除き、軌道検測データは 11 検測分、軸箱加速度データは 4 検測分を用いた。

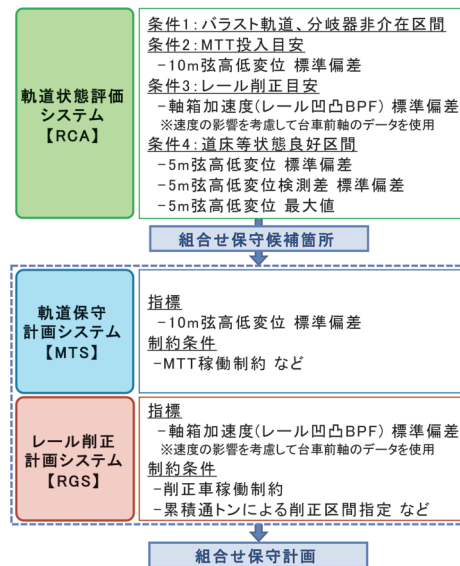


図 9 組み合わせ保守計画システムの構成

#### c) 施工計画延長と施工計画日数

一日当たりの施工計画延長および年間の施工計画日数は、MTT 保守とレール削正の直近の実績と近くなるように設定し、MTT の計画延長を 46.8km/年、レール削正の計画延長を 14.4km/年とした。

#### d) レール削正の改善量

図 2 に示した通り、十分なパス数で削正すると削正後のレール凹凸は 0.04mm 程度以下になると考えられる。また、図 7 におけるレール凹凸と軸箱加速度の関係式 (軸箱加速度  $[m/s^2] = 141.0 \times$  レール凹凸  $[mm]$ ) より、レール凹凸 0.04mm は、軸箱加速度  $5.6m/s^2$  相当であると推定できる。よって、削正後の軸箱加速度は、削正前の軸箱加速度に関わらず一律で  $5.6m/s^2$  になるものとした。なお、レール削正における十分なパス数は、図 7 で軸箱加速度から推定できるレール凹凸や、施工前のレール凹凸測定より定める必要がある。

#### e) 組み合わせ保守候補箇所の保守指定

表 1 に示した組み合わせ保守候補箇所選択条件において、候補箇所がより多く選定されるようにレール削正目安に関する条件②を軸箱加速度  $13m/s^2$  以上にして、組み合わせ保守を考慮した計画を試算した。また、組み合わせ保守およびその効果を考慮せず削正車と MTT の運用計画を独立に計画した場合の試算を行った。

### 4.2.2 試算結果

図 10 に、組み合わせ保守が計画されたロットの高低変位 (標準偏差) の推移例を示す。本システムでは、3.2節で導出した組み合わせ保守効果の推定モデルにより、組み合わせ保守後の高低変位進みの抑制効果を反映して推移予測することが可能である。

また、表 3 に本試算で得られた保守計画における、1

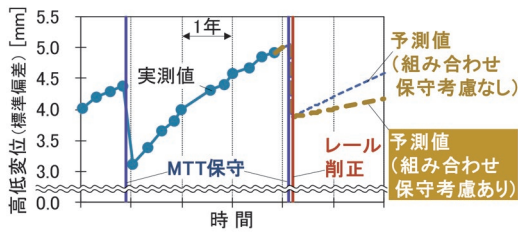


図 10 組み合わせ保守計画ロットの高低変位推移

表 3 試算結果

| 指標            | 組み合わせ保守の考慮 | 1年目開始時 | 1年目終了時        | 2年目終了時        | 3年目終了時         |
|---------------|------------|--------|---------------|---------------|----------------|
| 高低変位進み [mm/年] | あり         | 0.310  | 0.294 (-5.4%) | 0.286 (-7.7%) | 0.276 (-11.1%) |
|               | なし         |        | 0.311 (0.0%)  | 0.315 (+1.5%) | 0.317 (+2.0%)  |
| 高低変位[mm]      | あり         | 2.86   | 2.81 (-1.6%)  | 2.78 (-2.9%)  | 2.75 (-3.9%)   |
|               | なし         |        | 2.82 (-1.5%)  | 2.80 (-2.1%)  | 2.80 (-2.2%)   |

注：( )内の数値は各指標における1年目開始時からの増減率を表す。

年目開始時および各年度終了時の高低変位進みと高低変位を、計画対象全ロット（1,000 ロット）の平均値で示す。高低変位進みの結果を見ると、組み合わせ保守を考慮する場合は年を経過するごとに高低変位進みの抑制効果が累積されるために毎年度終了時の高低変位進みが低減していく。対して、組み合わせ保守を考慮しない場合においては、毎年度終了時の高低変位進みは微増していく。次に、高低変位の結果を見ると、1年目終了時は組み合わせ保守を考慮する方がわずかに小さいが、2年目、3年目と年を経過するごとに、組み合わせ保守を考慮する方が高低変位がより小さくなっていく、つまり軌道状態がより良化していく結果となる。なお、組み合わせ保守を考慮しない場合においては、上述のように軌道変位進みが年々微増する結果であるが、保守による軌道変位改善の効果がこれを上回るために、計画開始時より軌道変位が小さくなる結果となっている。

以上の結果から、組み合わせ保守を考慮して MTT とレール削正車を運用することで高低変位進みを抑制でき、線区の軌道状態を良化できると考えられる。また、年月が経過すると組み合わせ保守を考慮する方がより優れた結果となったことから、在来線における組み合わせ保守は短期的には効果が表れづらくても中長期的に継続することで効果が累積されて大きな効果を生むと考えられる。

## 5. まとめ

本研究のまとめは次の通りである。

- (1) 在来線における組み合わせ保守の高低変位進み抑制効果を検証するため、組み合わせ保守の試験施工をした。その結果、レール削正によるレール凹凸改善量が大きいほど、また、保守前の高低変位進みが大きいほど、組み合わせ保守による高低変位進み抑制

の効果が大きくなる傾向を確認した。

- (2) 新幹線で検証されていた組み合わせ保守候補箇所の選定条件や効果の推定モデルについて、在来線に適用するための分析を行った。その結果を受けて、組み合わせ保守による高低変位進み抑制等を実現するレール削正車と MTT の運用計画を策定するための組み合わせ保守計画システムに対して、在来線に適した入力パラメータを検討した。さらに、本モデルによる組み合わせ保守効果の推定値と実測値は近い値であることを確認した。
- (3) 組み合わせ保守計画システムを用いた試算を行った。その結果、組み合わせ保守を考慮して MTT 保守とレール削正を計画することで、高低変位および高低変位進みが小さくなる、つまり軌道状態が良化していく結果となった。

今後は、組み合わせ保守効果の持続期間の追跡調査や適切な組み合わせ保守計画延長の分析等、在来線における組み合わせ保守の実用化に向けて更なる検討を行う。

## 文献

- 1) 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
- 2) 佐野弘典, 田中博文: 車上モニタリングデータを活用したレール削正計画法の開発, JREA, Vol.58, No.3, pp.7-10, 2015
- 3) 古川敦: マルタイとレール削正車の併用による軌道保守周期の最適化, 鉄道工学論文集, No.13, pp.141-147, 2009
- 4) 松本麻美, 三和雅史, 吉田尚史, 矢坂健太, 桶谷栄一, 原田祐樹: レール削正と軌道変位保守の同時期実施を考慮した軌道保守計画法, 鉄道総研報告, Vol.30, No.10, pp.41-46, 2016
- 5) 松本麻美, 昆野修平, 森健矢: MTT 保守とレール削正の組み合わせ保守による軌道状態の延命化の実地検証, 土木学会, インフラメンテナンス実践研究論文集, Vol.2, pp.109-117, 2023
- 6) 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, 土木学会全国大会第 65 回年次学術講演会, pp.423-424, 2010
- 7) 田中博文, 梶原和博, 清水惇: レール表面の細かな凹凸を診る, RRR, Vol.76, No.2, pp.24-27, 2019
- 8) 田中博文, 松本麻美, 原田祐樹, 桶谷栄一: 軌道検測車で測定される軸箱加速度を活用したレール波状摩耗の状態評価と管理手法に関する研究, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.541-549, 2017
- 9) 三和雅史, 木村寛淳, 山中雅司: レール及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