

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

松本 麻美* 三和 雅史* 吉田 尚史*
矢坂 健太** 桶谷 栄一*** 原田 祐樹***

Modeling an Optimal Track Maintenance Schedule in Consideration of the Timing of Grinding and Tamping

Mami MATSUMOTO Masashi MIWA Takafumi YOSHIDA
Kenta YASAKA Eiichi OKETANI Yuki HARADA

Recently tamping machines have been used for the maintenance of ballasted tracks, and rail grinding machines are used for the removal of rail surface irregularity. Though the maintenance cycle could be extended and the amount of the total maintenance cost could be decreased by efficiently combining both, usually both machines are independently operated. Therefore, in order to easily find a suitable maintenance schedule including both the tamping and grinding, we built a model for estimating the effect of the combined maintenance, and developed a scheduling system. By test computation, we have confirmed that our model is effective in terms of maintenance quality. Moreover, we investigated the optimum amount of the combined maintenance.

キーワード：軌道保守，レール削正，高低変位進み，軸箱加速度，スケジューリング，数理計画モデル

1. はじめに

効率的な軌道保守を実現するためには、有限な保守費用や保守資源を効率的に運用することによって、中長期的に適正な軌道状態を維持できる保守計画を作成することが重要である。

現在、レール頭頂面の疲労層の除去や転動音の低減を目的として、レール削正車によるレール削正が定期的実施されている。また、バラスト軌道の軌道変位保守を目的としてマルチプルタイタンパによるつき固め（以下、「MTT 保守」という）が実施されている。一般にこれらの保守計画は、別々に作成されているが、レール削正と MTT 保守を組み合わせることで、組み合わせ保守後の高低変位（高低狂い）進みが組み合わせ保守前に比べて抑制される場合があることが既往の研究により分かっている¹⁾²⁾。これは、高低変位とレール凹凸が減少すると、これに伴う輪重変動が減少して高低変位進みが小さくなるためであると考えられている。図 1 に、組み合わせ保守実施箇所の高高低変位標準偏差、およびレール凹凸に起因する 0.075m から 0.25m のバンドパスフィルター処理を行った軸箱加速度（以下、「軸箱（レール凹凸）」という）標準偏差の推移

を示す。図より、レール削正により軸箱（レール凹凸）が減少し、その後の MTT 保守により高低変位の進みが小さくなっていることがわかる。

以上のように、組合せ保守を有効に行うことができれば、高低変位進みが抑制されることで軌道変位の保守周期が延伸し、軌道保守コストの削減が可能と考えられる。しかしながら、この組合せ保守の効果を定量化し、効果の推計モデルを構築した例はなく、またレール削正車と MTT 双方の運用を考慮して組合せ保守を計画するモデルもない。そのため、保守計画は、計画担当者により、またはそれぞれ既往のレール削正計画システム³⁾ および軌道変位保守計画システム⁴⁾ により、別々に作成されているのが実状である。

そこで本研究では、実データを分析して組合せ保守や、その効果を考慮して高低変位の推移を予測するモデル（組合せ保守モデル）を構築し、また本モデルに基づいて組合せ保守計画を作成するモデルを構築した。更に、組合せ保守計画システムを開発し、組合せ保守計画を容易に作成できるようにした。

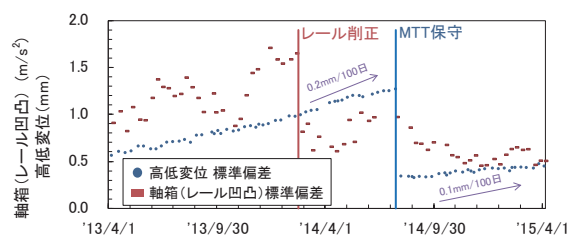


図 1 組合せ保守箇所の高高低変位と軸箱（レール凹凸）推移

* 軌道技術研究部 軌道管理研究室
** 軌道技術研究部 軌道管理研究室（現 西日本旅客鉄道株式会社）
*** 西日本旅客鉄道株式会社

特集：軌道技術

2. 組合せ保守モデルの構築

2.1 組合せ保守モデルの概念

ここでは、組合せ保守や、その効果を考慮して高低変位の推移を予測する組合せ保守モデルを構築する。図2に組合せ保守モデルの概要を示す。本モデルは、MTT保守にあわせてレール削正を行ったロットについては組合せ保守効果を適用し、年度末における高低変位を推定するものである。

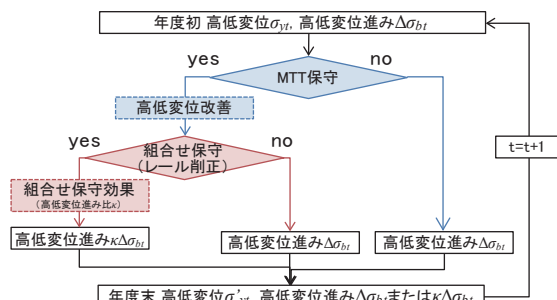


図2 組合せ保守モデルの概要

2.2 組合せ保守効果の指標（高低変位進み比 κ ）

組合せ保守の効果を表す指標として、組合せ保守前後の高低変位進み比 κ を用い、この算定式を式(1)に示す。

$$\kappa = \Delta\sigma_a / \Delta\sigma_b \quad (1)$$

- $\Delta\sigma_b$: 組合せ保守前の高低変位進み [mm/日]
- $\Delta\sigma_a$: 組合せ保守後の高低変位進み [mm/日]

なお、ここで図3(a)に示すようにレール削正を先に行うものを「削正先行」の組合せ保守、図3(b)に示すようにMTT保守を先に行うものを「MTT先行」の組合せ保守と定義する。

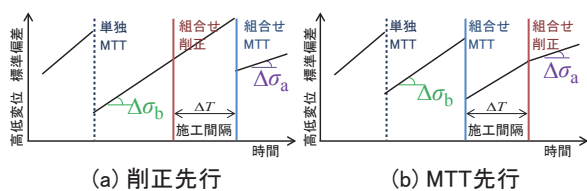


図3 組合せ保守施工順序

2.3 組合せ保守候補箇所

ここでは、組合せ保守による高低変位進み抑制効果を分析する。分析には、新幹線走行線区において軌道検

測車により測定された約3年分の軌道検測データと軸箱加速度の25m区間統計量、およびその間の保守実績を用いた。分析対象区間は、単独でのMTT保守の後に組合せ保守の実績がある箇所とし、また表1の全条件を満たす箇所とした。本表において指標に用いる軸箱加速度については、レール凹凸や道床状態を評価できる波長⁵⁾の帯域でバンドパスフィルター処理を行い、レール凹凸評価は軸箱（レール凹凸）、道床状態評価には2mから5mのバンドパスフィルター処理を行った軸箱加速度（以下、「軸箱（道床）」という）を用いた。各条件の考え方は次のとおりである。

条件①では、軌道構造等の影響を受けない箇所を抽出する。条件②では、高低変位が小さな箇所に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閾値⁶⁾を超える箇所を抽出する。条件③は、レール削正による凹凸改善効果を得られる可能性の高い箇所を選択するためのものであり、閾値はレール凹凸が比較的大きな箇所を抽出できるように実績から設定した。条件④では、道床状態が悪い箇所については組合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、道床状態の良好な区間を抽出する。具体的には、発生バラストを10mmふるいマスに通過させ、その通過率と全体との体積比から細粒土混入率を算出し、その数値が25%を超えると道床状態不良、25%以下で道床状態良好とした。その上で、細粒土混入率と5m弦高低変位との相関が高いことを利用し、図4のように5m弦高低変位の閾値を設けた。また、この値に加えて、実績を参考に軸箱（道床）の閾値を設けた。

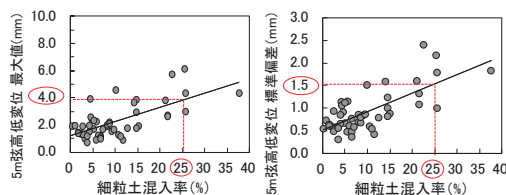


図4 細粒土混入率と5m弦高低変位最大値及び標準偏差

2.4 高低変位進み比への影響要因

2.4.1 施工間隔、施工順序

図5(a)に高低変位進み比 κ と施工間隔 ΔT の関係を施工順序別に示す。削正先行、MTT先行ともに、施工

表1 組合せ保守候補箇所の条件

条件	組合せ保守候補箇所の条件	指標	閾値
①	有道床、分岐器・IJ・EJ非介入、高速区間(170km/h以上)		
②	年度内にMTT保守等しない場合、計画策定の年度内に10m弦高低変位が目安値を超過する可能性のある箇所	10m弦高低変位 標準偏差	1.1mm以上
③	レール状態不良区間	軸箱(レール凹凸) 標準偏差	0.7m/s ² 以上
④	道床状態が良好な区間	5m弦高低変位 最大値	4.0mm以下
		5m弦高低変位 標準偏差	1.5mm以下
		軸箱(道床) 最大値	7.0m/s ² 以下

間隔が短いほど高低変位進み比 κ は小さくなる（効果が大きい）傾向にある。削正先行では施工間隔が 0 日から 70 日頃までは高低変位進み比 κ はほぼ同じであるが、70 日以上になると、施工間隔に応じて高低変位進み比 κ は大きくなり、概ね 300 日で組合せ保守効果はほとんどみられなくなる。一方、MTT 先行では、データ数が少ないものの、削正先行と同様の傾向にあると仮定すると、施工間隔が 0 日から 20 日頃までは高低変位進み比 κ は一定であり、概ね 180 日までは施工間隔に応じて高低変位進み比 κ は大きくなり、180 日以上では組合せ保守効果はなくなると推定される。

また、MTT 先行より削正先行の方が、組合せ保守効果が高い。これは、レール削正によりレール凹凸を減少させてから MTT 保守した方が、輪重変動が十分に低減されていることで、整正された軌道変位が小さいまま推移することになり、高低変位進みが抑制されるためと考えられる。

2.4.2 軸箱（レール凹凸）標準偏差の改善量

図 5 (b) に高低変位進み比 κ と軸箱（レール凹凸）標準偏差の改善量 $\Delta\alpha$ の関係を示す。軸箱（レール凹凸）標準偏差の改善量 $\Delta\alpha$ は式 (2) から求められる。

$$\Delta\alpha = \Delta\alpha_{Cb} - \Delta\alpha_{Ca} \quad [m/s^2] \quad (2)$$

$\Delta\alpha_{Cb}$: レール削正前の軸箱（レール凹凸）標準偏差
 $\Delta\alpha_{Ca}$: レール削正後の軸箱（レール凹凸）標準偏差

図から、削正先行、MTT 先行ともに、レール削正前後の軸箱（レール凹凸）標準偏差の改善量が大きいほど高低変位進み比 κ は小さくなり、組合せ保守効果が大きくなる傾向にあることがわかる。

2.5 高低変位進み比推定モデルの構築

以上の結果より、高低変位進み比 κ には施工間隔及び軸箱（レール凹凸）標準偏差の改善量の影響が大きいと考えられることから、高低変位進み比 κ の推定モデルを表 2 のとおり設定した。本推定モデルでは、施工間隔がある程度短い場合は、高低変位進み比 κ の施工間隔への依存度が低下するため、施工間隔を変数としなかった。また、MTT 先行の場合については分析したデータの数が少なかったため、削正先行の推定モデルに一定量を加算する形でモデル化した。今後、モデル化に十分なデータ量が蓄積された際に、本推定モデルを改良することが考えられる。

2.6 高低変位進み比推定モデルの精度検証

高低変位進み比推定モデルの精度を確認するため、図 6 に高低変位進み比 κ の実測値とモデルから得た推定値の関係を示す。実測値と推定値の差の標準偏差は 0.12 であり、本モデルにより、今回分析した箇所における高低変位進み比 κ は十分な精度で推定できると考えられる。

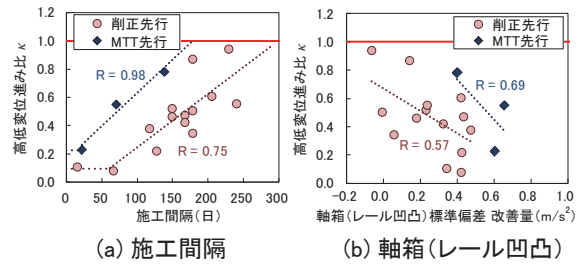


図 5 高低変位進み比 κ との関係

表 2 高低変位進み比推定モデル

	施工間隔 [日]	高低変位進み比推定モデル
先削 行正	$0 \leq \Delta T < 70$	$\kappa = -0.4 \times \Delta\alpha + 0.25$
	$70 \leq \Delta T < 300$	$\kappa = -0.31 \times \Delta\alpha + 0.0028 \times \Delta T + 0.12$
	$300 \leq \Delta T$	$\kappa = 1.0$
先 MTT 行	$0 < \Delta T < 20$	$\kappa = -0.40 \times \Delta\alpha + 0.46$
	$20 \leq \Delta T < 180$	$\kappa = -0.31 \times \Delta\alpha + 0.0028 \times \Delta T + 0.54$
	$180 \leq \Delta T$	$\kappa = 1.0$

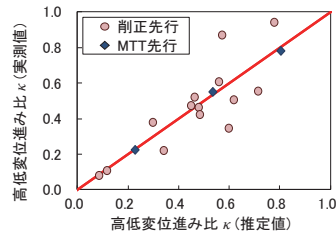


図 6 高低変位進み比 κ の推定値と実測値の関係

3. 組合せ保守計画システムの開発と検証

3.1 組合せ保守計画システムの開発

既に開発されている軌道状態評価システム (RCA)⁷⁾、軌道変位保守計画システム (MTS)、レール削正計画システム (RGS) の 3 システムを連携させて、組合せ保守モデルに基づく保守計画を容易に策定できる、「組合せ保守計画システム」を開発した。図 7 に本システムの構成を示す。

組合せ保守計画を作成する手順は以下のとおりである。

- ① RCA により軌道検測データ等を分析し、2.3 節の条件 (表 1) に基づいて組合せ保守の効果が見込める箇所を組合せ保守候補箇所とする。
- ② この組合せ保守候補箇所については、次の 2 通りの方法で考慮して組合せ保守計画を作成する。1 つは、組合せ保守候補箇所を MTT 保守計画作成時にも考慮する場合 (図 7 【1】) であり、手順①で選定した組合せ保守候補箇所を MTS に入力し、候補箇所には必ず MTT 保守が行われるように MTT 保守計画を作成する。もう 1 つは、候補箇所を MTT 保守計画作成時には考慮せず、次の手順③のレール削正計画作成時から考慮する場合 (図 7 【2】) である。
- ③ 組合せ保守候補箇所における MTT 保守時期を RGS

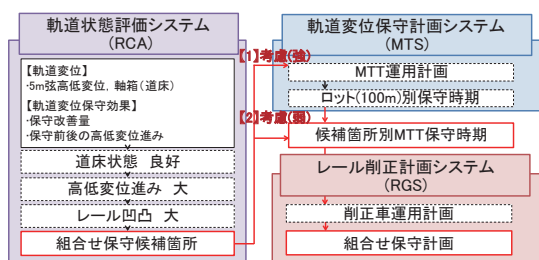


図7 組合せ保守計画作成システムの構成

に入力して、MTT 保守時期前後の一定期間内（なるべく施工間隔が短くなるよう）にレール削正が計画されるよう組合せ保守計画を作成する。

- ④ 組合せ保守されるロットに対しては高低変位進み比 κ を適用し、年度末の軌道状態を得る。

3.2 組合せ保守計画システムによる計画の作成

開発した組合せ保守計画システムを、MTT 保守対象ロット数が 800 ロット（100m/ ロット）存在する線区データに適用し、単年度の組合せ保守計画を作成した。

まず、RCA により組合せ保守候補箇所を選択した結果、107 ロットが組合せ保守候補箇所選ばれた。

次に、組合せ保守計画システムにより、組合せ保守を考慮した MTT 保守とレール削正の計画を作成した。図8は組合せ保守が計画されたロットにおける高低変位の推移例である。本ロットにおいては、組合せ保守を行うことで高低変位進みの傾きが40%程度緩やかになると予測された。また、全線における年度末の高低変位標準偏差を予測した結果を表3に示す。

年度末の状態が最良になるのは、組合せ保守の考慮の程度が弱い場合（図7【2】）であった。一方、考慮の程度が強い場合（図7【1】）は、年度末の状態が最も悪くなったが、高低変位進みについては最小となった。この様に、組合せ保守を行うことで、従来と同じ保守量であっても、高低変位、あるいは高低変位進みが小さく良好な軌道状態を長期的に維持できる可能性が高いと考えられる。

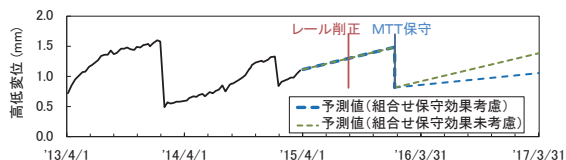


図8 組合せ保守が計画されたロットの高低変位の推移例

表3 組合せ保守計画システムの計算結果

組合せ保守効果考慮	組合せ保守考慮の程度	高低変位標準偏差 [mm]		高低変位進み [mm/100日]	
		年度初	年度末	年度初	年度末
	なし		0.841		0.283
あり	強 (図7【1】)	0.980	0.855	0.335	0.268
あり	弱 (図7【2】)		0.831		0.282

4. 適正な組合せ保守量の検討

4.1 検討の考え方

組合せ保守により保守周期が延伸する一方で、組合せ保守に偏重して計画を作成すると、本来保守すべき高低変位の大きな箇所への保守が計画されない可能性がある。

そこで、組合せ保守量の適正値を予め把握し、計画作成の際に考慮する方法を検討する。ここで、この適正な組合せ保守量の検討では、MTT 保守量そのものと、そのうち組合せ保守に割り当てる量を考慮することが重要と考え、以下の指標を定義する。

(1) MTT 保守率

MTT 保守対象ロット数のうち、実際に MTT 保守を行うロットの割合を MTT 保守率 r (式(3)) とする。即ち、MTT 保守対象ロット数に r を乗じると MTT 保守量が得られる。

$$\text{MTT保守率} : r = L' / L \quad (0 \leq r \leq 1) \quad (3)$$

$$\begin{cases} L' : \text{MTT 保守量 (ロット)} \\ L : \text{MTT 保守対象ロット数} \end{cases}$$

(2) 組合せ保守率

MTT 保守量のうち組合せ保守を行うロットの割合を組合せ保守率 f (式(4)) とする。即ち、MTT 保守量に f を乗じると組合せ保守量が得られる。

$$\text{組合せ保守率} : f = L' / L' \quad (4)$$

$$L' : \text{組合せ保守量 (ロット)}$$

適切な組合せ保守量を検討するためには、上述の MTT 保守率 r や組合せ保守率 f に応じた計画を作成し、その際の年度末の軌道状態を評価する必要があるが、図7に示したシステムによる計算を繰り返して検討するのは、多くの手間を要するため非効率である。そこで、MTT 保守率 r や組合せ保守率 f を考慮して年度末の高低変位（全ロットの平均値）を簡易に推定するモデルを以下のように考えた。

まず、年度開始時の各ロットの高低変位標準偏差を σ_0 とすると、年度終了時の高低変位標準偏差 σ_1 は、表4により算出できる。ここでは、レール削正と MTT 保守とも年度の間日に施工すると仮定し、各ロットの MTT 保守による改善量を x_i 、保守対象ロットの改善量の平均値を \bar{x} と表す。また、組合せ保守を行うロットについては、組合せ保守効果を考慮する。ここで、MTT 保守対象ロットについては以下のように考える。

図9に、3.2節で計画を作成した線区におけるロット別の改善量を降順に示す。図では3.1節の手順①により組合せ保守候補箇所とされた107ロットを区別できるよう、色分けして示した。組合せ保守を考慮せずに計画を作成する場合、本来 MTT 保守は数百mにわたって連続的に施工されるため、改善量の異なるロットが混在して

保守されるが、ここでは簡便のため改善量の大きなロットから順に MTT 保守が施工されるとする。例えば、 $r = 0.1$ のときは改善量の大きな上位 10% (80 ロット) が保守されると考える。そして、表 4 の算出式を各ロットに適用し、年度末の高低変位を算出する。

一方、組合せ保守を考慮して計画を作成する場合には、組合せ保守率 f に応じて、組合せ保守を考慮した高低変位の改善量の分布図を作成して MTT 保守箇所を選択する。例えば、この線区での過去の実績を考慮して、MTT 保守率を $r = 0.26$ ($=206/800$) とした場合において、図 10 (a) は「MTT 重視」の場合 (図 7【2】に相当、 $f=0.18$)、図 10 (b) は「組合せ重視」の場合 (図 7【1】に相当、 $f=0.52$) の MTT 保守箇所の改善量をその降順に並べたものである。図 10 (a) は、図 9 を 206 ロットまでで打ち切ったものであるのに対し、図 10 (b) は全ての組合せ保守候補箇所 (107 ロット) を保守するため、No.123 までは図 10 (a) と同じであるが No.123 以降は組合せ保守候補箇所だけから構成される。このため、図 9 とは形が異なり、MTT 保守による改善量が小さなロットが保守対象に選ばれていることがわかる。この結果、保守ロットの平均改善量 \bar{x}_y は「MTT 重視」では 0.83 であるのに対し「組合せ重視」では 0.70 であり、同じ保守量でも「組合せ重視」のほうが改善量の平均値 \bar{x}_y は約 15% 小さい。

このように、組合せ保守は高低変位進みの抑制効果により、良好な軌道状態を維持できる可能性が高い一方、組合せ保守に偏重して計画を作成すると、図 10 (b) の No.150 付近以降のロットの様な改善量が小さな箇所が保守対象となり、この影響で本来保守されるべき高低変位が大きい箇所 (非組合せ保守候補箇所) への保守が計画されないことが懸念される。

4.2 組合せ保守率の適正值

以上のことから、組合せ保守率 f の適正值を検討するために、先述の年度末の軌道状態の簡易な推定モデルにより、3 年間の軌道状態推移をシミュレーションした。ここで、組合せ保守候補箇所については毎年度選択する他、各ロットにおける MTT 保守による高低変位改善量も、前年度の保守計画を考慮したうえで毎年度算定して図 9 と同様の図を作成し、MTT 保守箇所を選択する。

図 11 にシミュレーションにより得られた MTT 保守率 r と年度末の高低変位の各年度の関係を示す。図 11 (a) は「MTT 重視」の場合、図 11 (b) は「組合せ重視」の場合に分けて示す。これより、MTT 保守率 r が小さいと年度末の軌道状態は年々悪くなる一方、図 11 (a)、(b) 共に $r=0.6$ 以上になると MTT 保守率 r が変化しても年度末の軌道状態に大差がなくなり、一定値に収束する。また、図 11 (a) は $r=0.15$ 付近、図 12 (b) は $r=0.20$ 付

表 4 年度末の高低変位算出式

	MTT 保守	組合せ保守	高低変位 標準偏差 算出式
①	×	×	$\sigma'_y = \sigma_{y0} + \Delta\sigma_b$
②	○	×	$\sigma'_y = \sigma_{y0} + \Delta\sigma_b - x_r$
③	○	○	$\sigma'_y = \sigma_{y0} + (1+\kappa)\Delta\sigma_b/2 - x_r$

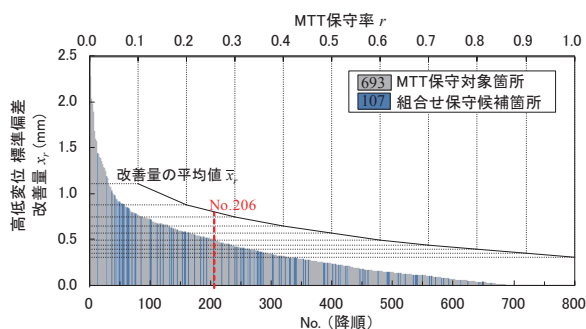


図 9 高低変位改善量の分布

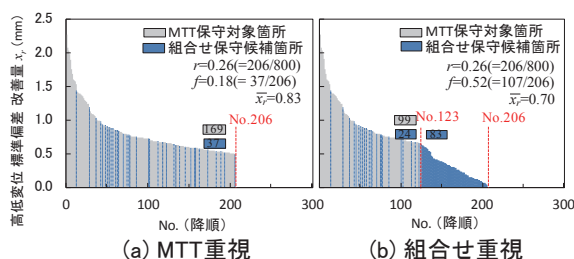


図 10 組合せ保守対象箇所の改善量

近に交点 P_a 、 P_b があり、この MTT 保守率 r のときに毎年度末の軌道状態はほぼ一定値で継続的に維持されると考えられる。4.1 節で述べた通り、「組合せ重視」の場合は改善量が小さなロットを毎年選定してしまう可能性があるため、本シミュレーションにより得られる結果としては P_a より P_b の方が MTT 保守率 r が大きくなっている。

図 12 に、組合せ保守箇所数およびその保守率 f と、各年度末の高低変位の関係を MTT 保守率 r 毎に示す。図から、MTT 保守率 r が小さいと年度末の軌道状態は悪くなり、特に f が大きな場合に年々軌道状態が悪化している。これより、MTT 保守量が少ない場合は高低変位が大きい箇所、即ち改善量が大きい箇所を優先して保守する必要があるため、複合保守率 f を小さく留める必要があることがわかる。また、各 MTT 保守率 r において、年度末の高低変位が最良となる組合せ保守率 f^+ が存在し、この f^+ は MTT 保守率 r が大きくなると増える傾向にある。 f^+ においては、MTT 保守率 r は同じであっても年々軌道状態が改善しており、組合せ保守の効果が表れている。

以上より、年度末の軌道状態は MTT 保守率 r と組合せ保守率 f によって変動するが、 r が与えられるとすると、この簡易な推定モデルから組合せ保守率 f^+ を求めることができ、最も効率の良い組合せ保守量のもとで、計画を作成することが可能となる。

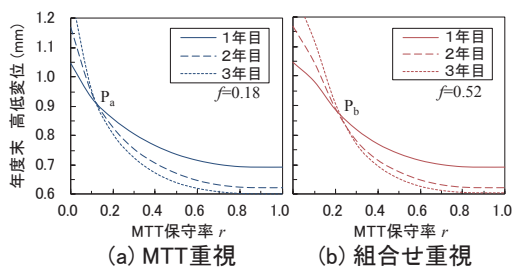


図 11 MTT 保守率と年度末の高低変位

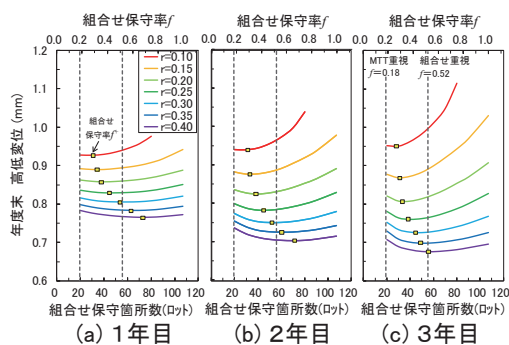


図 12 組合せ保守率と年度末の高低変位

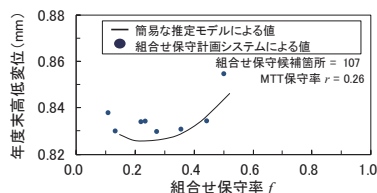


図 13 組合せ保守率と高低変位の関係

4.3 システムにより得られる組合せ保守率との比較

上述の簡易な推定モデルで得られた組合せ保守率の適正値の妥当性を検証するために、組合せ保守計画システムにより組合せ保守率 f と年度末軌道状態の関係を分析した。図 13 にその結果と簡易な推定モデルで算出した結果を併せて示す。

システムでは保守の施工単位としていくつか連続したロットに対してスケジューリングして MTT 保守計画とレール削正計画を作成し、年度末の高低変位を算出する。しかし、簡易な推定モデルでは保守の施工単位をロットとして考慮するため、簡易な推定モデルで得られる軌道状態はシステムで得られる軌道状態のほぼ下限となる。また、MTT 保守とレール削正は計画年度の間日に行うと考えることにより、システムでの予測結果とは差異が存在するが、両者の結果は極めて近い。以上の結果、今回検討した線区における年度終了時の高低変位標準偏差は、モデルとシステムのいずれの出力においても $f^+ = 0.25$ 程度で最小となり、簡易な推定モデルによる検討結果は十分な精度を有することがわかった。よって、簡易な推定モデルから求めた組合せ保守率 f^+ を組合せ保守計画作成システムへの入力値 (図 7) として保守計画を作成することにより、単年度における軌道状態を向

上させつつ保守周期の延伸を図ることが可能な、組合せ保守を考慮した年間計画を容易に作成できる。

5. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 約 3 年分の軌道検測データ等の実績から分析を行った結果、組合せ保守の効果は MTT とレール削正の施工間隔と順序、削正による軸箱加速度の改善量の影響を受けることがわかった。
- (2) 上記 (1) の関係に基づいて組合せ保守効果を推定するモデルを構築した。本モデルによる推定値を実測値と比較した結果、モデルの精度は十分であることを確認した。
- (3) 組合せ保守計画システムを開発し、構築したモデルに基づく計画を容易に作成できるようになった。
- (4) 組合せ保守量の適正値を簡易に推定するモデルを構築し、中期的に効果的な計画の作成が可能となった。

以上より、これまで別々に作成されていた MTT 保守とレール削正計画を連携させることが可能となり、軌道状態の向上と保守周期の延伸を実現できると考えられる。今後は実証試験等により、本システムの妥当性を検証する予定である。

文 献

- 1) 古川敦：マルチ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
- 2) 矢坂健太，三和雅史，佐々木陽：レール削正とマルチプルタイタンパの複合保守の効果に関する検討，土木学会年次学術講演会概要集，第 70 回，No. VI -467，2015
- 3) 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，第 58 巻，3 号，pp.7-10，2015
- 4) 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
- 5) 下野勇希，山口義信，田中博文，木村寛敦：バラスト軌道における保守多投入箇所の効率的な管理方法の検討，第 17 回鉄道技術連合シンポジウム (J-Rail2010)，pp.577-580，2010
- 6) 高橋亮一：山陽新幹線における標準偏差 (σ 値) 管理，新線路，9 月，pp.18-20，1998
- 7) 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