

保守費用と軌道状態の関係分析に基づく 経済的な保守計画の作成法と品質向上策の検討

三 和 雅 史

1 はじめに

日本の鉄道において一般的な軌道構造であるバラスト軌道は施工時の作業性や経済性に優れているが、振動を伴う列車の繰り返し通過により軌道面の不整（軌道変位）が徐々に成長する（軌道変位進み）。この軌道変位を著大になるまで放置しておくると列車の走行安全性や乗客の乗り心地が低下するため、これを測定（検測）して復元・補修するのが軌道変位保守である。このため、鉄道事業者においては、適切な保守費用で十分な品質の軌道状態を維持できる経済的な保守計画の作成が重要である。

このような保守計画を効率的に、また最適に作成しようという試みは、これまでも多くなされてきた。まず、20世紀末にかけては計算機技術や情報通信技術の発展により、多くの鉄道事業者では軌道構造や構造物等の台帳データ、検査データがデジタル化された（近藤ほか（1994）、百崎ほか（1994））。これにより各箇所軌道の諸元・検査データ等の情報がサーバーで一元的に管理され、計画担当者がデータを容易に収集、分析できるようになり、保守計画の品質向上が進んだ。その後、軌道変位の履歴データにより将来の推移を予測し、近い将来に管理値を超過する箇所を抽出する手法（田中ほか（1998）、斉藤ほか（1989））やシステム（大竹ほか（1997）、垂井（2011））が開発され、近年ではビッグデータ分析やAI等の新しい技術の活用が進んでいる。筆者らにおいても、将来の軌道状態推移の予測結果に基づき、軌道変位保守用大型機械（MTT：Multiple Tie Tamper）の運用上の制約を考慮して保守の対象箇所と時期を含む軌道変位保守スケジュールを数理計画法により最適に作成する最適軌道保守計画モデル（三和ほか（2001）、Miwa et al.（2004）、Oyama et al.（2006））を構築し、またレール削正、道床交換といった、類似の大型機械を用いた軌道保守計画についても最適に作成できるモデルを構築する等（三和ほか（2021））、保守計画の最適化の取り組みを進めてきた。

一方、軌道保守によって軌道状態は改善するがコストを要するため、計画の品質を評価する際には、保守費用と軌道状態の関係を考慮する必要がある。よって、保守計画モデルにおける計画条件を様々に変えて計画を作成し、比較、分析することが考えられる。

以上のことから、本研究では、上述の最適軌道保守計画モデルを用いて経済的な軌道変位

図1 モデルの構成

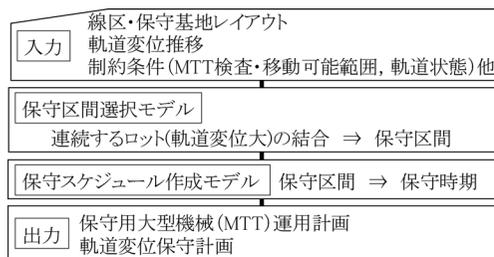


図2 ロットとブロック



保守計画を作成するための計画条件を検討する。この際、主要線区や閑散線区といった線区の特徴を考慮して計画条件や評価関数を提案し、実線区データによりその有効性を検証する。また、近年進む保守用機械の多様化やシミュレーション技術の利用、活用による保守計画の品質向上等についても検討する。

本論文の構成は以下の通りである。

1章では、本研究の目的や意義、概要等を示す。2章では、分析に用いる最適軌道保守計画モデルを示す。そして、3章では、本モデルにより保守費用と軌道状態の関係を分析し、経済的な保守計画の作成法を検討、提案する。4章では、近年の軌道管理を取り巻く状況を踏まえて経済性と品質を考慮した新しい保守計画モデルへの発展の方向性を検討する。5章では、まとめと将来課題を示す。

2 最適軌道保守計画モデル

ここでは、筆者らがこれまでに構築した最適軌道保守計画モデルの詳細を示す。本モデルは予め年間保守量（保守延長）が与えられた条件下で、対象エリア内全体の平均的な軌道状態をできるだけ良好に維持する軌道変位保守の年間計画を出力する。

モデルの構造を図1に示す。本モデルでは、線区及び保守基地レイアウトと各箇所での軌道変位推移の予測結果、計画作成上の制約条件を入力データとし、MTT運用計画（各期〔週や旬等の任意の期間長さ〕にMTTを配備する保守基地を示す）と軌道変位保守計画（各基地へのMTT配備期に保守する箇所を示す）を出力する。

本モデルでは図2に示すロット（100 m 区間）、ブロックという単位に計画対象線区を分割して保守計画を検討する。各単位の内容は以下の通りである。

- ・ロット（軌道変位管理、予測単位）

軌道変位推移の管理、予測単位は100 m 区間とし、これをロットと呼ぶ。予測には軌道変位標準偏差を指標として用いる。

- ・ブロック（保守作業単位）

連続する N 個のロットの集合 ($N \times 100$ m) をブロックと呼ぶ。 N の値については各線区の実態を考慮して、ブロックの長さが 1 回あたりの保守延長に概ね等しくなるように設定する。

保守計画としては、MTT の保守基地への配備計画 (MTT 運用計画)、ブロックと保守時期の組み合わせ (軌道変位保守計画) が出力される。本モデルの目的関数は、軌道変位標準偏差の計画期間中平均値の最小化とする。ここで、軌道変位標準偏差と保守改善量 (保守によりもたらされる軌道変位標準偏差の減少量) とは線形の関係にあるとみなせることから、本目的関数は「保守改善量」と「保守後から計画期間終了時までの期の数」の積の最大化と同値になる (三和ほか (2001), Oyama et al. (2006))。よって、保守改善量が大きく見込まれるロット、即ち軌道変位が大きなロットをできるだけ多く含むようにブロックを作成した後、各ブロックの保守時期を決定する階層構造とする。つまり、最適軌道保守計画モデルでは、先にロット集合から保守区間であるブロックを選択する処理を保守区間選択モデルにより行った上で、作成した各ブロックに対し、保守スケジュール作成モデルにより保守時期を割り付ける。一般に、分析対象とするシステムの構造が複雑な場合、そのままモデル化するとモデルの規模が巨大となって、厳密な最適解を得ることが困難になる可能性が高い。このような場合には、システムとしての整合性を失うことなく問題を多層的に捉えた上で、前もって小問題 (sub-problem) を解いておくという最適化の前処理 (pre-optimization) を実施するのがよいとされている (大山ほか (1999)) ことから、本計画モデルは、これに準じた構造とした。

以下では、保守区間選択モデルと保守スケジュール作成モデルについて、詳しく述べる。

2.1 保守区間選択モデル

本モデルでは、ロット集合 $L = \{1, 2, 3, \dots, L^{\max}\}$ において、連続する N 個のロットから成るブロックを選択する場合に、ブロックの始点となるロットを決定変数とする。

制約条件は論理制約やブロックの選択方法、選択するブロック数の上限値、軌道変位の状態に関する制約とから構成される。

目的関数はブロックに含まれるロットの保守改善量の総和の最大化とする。

(1) 決定変数

v_i : 0-1 型整数変数, $i \in L$

=1 ロット i から連続 N ロットをブロックとして選択する

=0 〃 しない

保守費用と軌道状態の関係分析に基づく経済的な保守計画の作成法と品質向上策の検討

(2) 制約条件

i) ブロック選択論理制約

ロット i を始点とするブロックが選択される場合、ロット $i+1$ から $\min\{i+(N-1), e\}$ を始点とするブロックを選択できないことを表す制約である。

$$\sum_{j=i}^{\min\{i+(N-1), e\}} v_j \leq 1 \quad i \in L, L_1 \subseteq L \quad (1)$$

$L_1 = \{\text{線区の終端等のロット}\}$

e : L_1 に含まれるロットに対応して決まるロット

ii) ロット別保守制約

軌道変位が計画期間中に管理値を超過するロットや工事に合わせて保守するロット等、保守が必須のロットをブロックに含むことを表す制約である。

$$\sum_{j=\max\{i-(N-1), f\}}^i v_j = 1 \quad i \in L_2 \subseteq L, L_3 \subseteq L \quad (2)$$

$L_2 = \{\text{指定ロット}\}$, $L_3 = \{\text{線区の始点等のロット}\}$

f : L_3 に含まれるロットに対応して決まるロット

iii) 選択ブロック数上限制約

総保守量 (例えば、年間保守延長) に対応して、選択されるブロック数の上限を与える制約である。

$$\sum_{i \in L} v_i \leq U^{\max} \quad U^{\max} : \text{選択ブロック数上限} \quad (3)$$

(3) 目的関数

ブロックに含まれる各ロットの保守改善量 r_i の総和を最大化するようにブロックを選択する。本目的関数は以下のように表される。

$$\max. \quad \sum_{i=1}^{\max\{L^{\max}-(N-1), f\}} s_i \cdot v_i \quad (4)$$

s_i は以下のように表される。

$$s_i = \sum_{j=i}^{\min\{i+(N-1), e\}} r_j \quad i \in L \quad (5)$$

なお、軌道変位標準偏差の値が同じであっても、列車速度等が異なる区間において劣化状態としての評価を変える必要がある場合には、保守改善量を各ロットの軌道変位標準偏差の目標値で除した値を保守改善量の代わりに用いる。この値は、各ロットの保守の優先度 (保守優先度) を表すと考えられ、ロット i の保守優先度 r'_i については以下により表される。

保守費用と軌道状態の関係分析に基づく経済的な保守計画の作成法と品質向上策の検討

iii) 期別保守ブロック数上限制約

各期に保守するブロック数の上限値を与える制約である。

$$\sum_{j \in J} w_{mkj} \leq A_{mk} \quad m \in M, k \in K \quad (9)$$

A_{mk} : 月 m , 期 k の保守ブロック数の上限値

iv) 期別ブロック別保守可能時期制約

特定の期に特定のブロックへの保守を禁止する形で、各ブロックの保守可能時期を設定する制約である。

$$\sum_{j \in J} \sum_{(m, k) \in R_j} w_{mkj} = 0 \quad j \in J \subseteq U, R_j \subseteq M \times K \quad (10)$$

v) ブロック別保守回数上限制約

各ブロックへの保守は期間中に最大1回とすることを表す制約である。

$$\sum_{m \in M} \sum_{k \in K} w_{mkj} \leq 1 \quad j \in J \quad (11)$$

vi) 期別 MTT 稼働論理制約

各ブロックは、そのブロックを担当可能な保守基地に MTT が配備された期にのみ保守が可能であることを表す制約である。

$$\sum_{j \in J_d^1} w_{mkj} - A_{mk} \sum_{d \in D_j} z_{mkd} \leq 0 \quad (12)$$

$$J_d^1 \subseteq U, m \in M, k \in K, D_j \subseteq D$$

$$J_d^1 = \{\text{保守基地 } d \text{ から保守可能なブロック}\}$$

$$D_j = \{\text{ブロック } j \text{ を保守可能な保守基地}\}$$

vii) 期間 MTT 移動可能範囲制約

連続する期にわたって MTT が移動できる範囲を保守基地により設定する制約である。

$$C \cdot z_{mkd} + \sum_{d \in D_1^d} z_{m(k+1)d} \leq C \quad (13)$$

$$m \in M, k \in K, d \in D, D_1^d \subseteq D$$

$$C : \sum_{d \in D_1^d} z_{m(k+1)d} \text{ の最大値}$$

$$D_1^d = \{\text{ある期に保守基地 } d \text{ に MTT を配備した場合、次の期に配備不可能な保守基地}\}$$

viii) 期別ブロック別保守制約

特定のブロックについて、指定期間中に必ず保守することを表す制約である。例えば、材料交換等を考慮して保守時期を指定するブロックや計画期間中に軌道変位が管理値を超過することが見込まれるブロックが本制約の対象となる。

$$\sum_{(m,k) \in G_j} w_{mkj} = 1 \quad j \in J \subseteq U, G_j \subseteq M \times K \quad (14)$$

(3) 目的関数

計画期間中の軌道変位標準偏差の全ブロック平均値の最小化とするが、本目的関数は以下の式と同値である。本式は保守改善量と保守後から計画期間終了時までの期の数の積を表す。

$$\max. \quad K^{\max} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{x \in 1}^{m-1} \sum_{k=1}^{K^{\max}} \Delta S_r^j w_{xkj} + \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \sum_{y \in 1}^k \Delta S_r^j w_{muj} \quad (15)$$

ΔS_r^j : ブロック j (に含まれるロット) の保守改善量

なお、2.1 の保守区間選択モデルの (3) 目的関数で記述したのと同様に、列車速度等が線区、区間で異なることを考慮する場合には、この保守改善量の代わりに保守優先度を用いる。

本節に示した保守区間選択モデルと保守スケジュール作成モデルは、いずれも全整数型計画モデルであるが、特に保守スケジュール作成モデルにおいては、適用対象とする線区によっては 0-1 型整数変数の個数が $M^{\max} \times K^{\max} \times (D^{\max} + U^{\max})$ と表され、膨大となるため、厳密な最適解を求めるのに長時間を要する場合がある。しかしながら、筆者らがこれまで行ってきた実際のデータを用いた全ての例において、変数 w_{mku} の整数条件を緩和した連続型線形計画問題の最適解に対して 97% 以上の高い精度の整数解を短時間で得られている (Oyama et al. (2006))。また、これらのモデルの有効性、実用性の高さについては現業区における実証試験により確認されている (河西ほか (2004))。

3 経済性を考慮した保守計画の作成

一般に、軌道の維持においては、列車の走行安全性の確保の他、良好な乗り心地、即ち快適性の確保が重要である。よって、適切な軌道状態をできるだけ少ない費用で実現する経済的な計画の作成が望まれる。そこで、前章までに示した最適軌道保守計画モデルを用いて保守費用と軌道状態との関係を分析する。この際、計画条件が計画の品質に与える影響を評価し、計画条件の適正化による経済的な保守計画の作成法を検討する。そして、保守費用と軌道状態の両方を同時に考慮した計画の作成が可能な多目標計画モデルにモデルを拡張する。

3.1 保守費用の推計

これまでに検討された保守方法の適正化等の例 (栗山 (2005)) によれば、MTT 保守費用は大きく次の 4 つに分けられる。

固定費: MTT を保有するために必要な費用であり、1 台あたりの単価として設定できる。

保守費用と軌道状態の関係分析に基づく経済的な保守計画の作成法と品質向上策の検討

人件費：MTT 保守に必要な作業員にかかる経費であり，近年では保守の外注化が進んでいることを考慮すると，1日あたりの単価として設定できる。

MTT 作業費：消耗品の交換費用や MTT 保守に必要な燃料費等であり，単位保守延長あたりの単価として設定できる。

MTT 回送費：保守基地と保守箇所の間，あるいは保守箇所間相互，保守基地間相互で MTT を回送するために必要な費用であり，単位回送距離あたりの単価として設定できる。

以上の各費用を用いることで，MTT 保守に要する年間費用 C_t は，以下の式により推計できる。

$$C_t = C_f + C_v = C_f + a \times d + b \times L + c \times L' \quad (16)$$

固定費 C_f 円 / 年，変動費 C_v 円 / 年

人件費 a 円 / 日，MTT 作業費 b 円 / km

MTT 回送費 c 円 / km，年間保守日数 d 日 / 年

年間保守延長 L km / 年，年間 MTT 回送距離 L' km / 年

一般的と考えられる単価や保守実績を考慮して，ある MTT の年間保守費用を推計した例を図 3 に示す。MTT 回送費は他の費用に比べて極めて小さいことから，これを最適化しても経済的な効果は小さいと考えられる。一方，固定費の割合が高いことから，MTT の保有台数の適正化が保守の総合的な経済性の向上に有効であると理解できる。また，人件費，MTT 作業費の割合も高いことから，保有台数が所与の条件下では，MTT の運用や保守計画の最適化により人件費，MTT 作業費を適正化するのが有効と考えられる。そこで，以下では人件費と MTT 作業費の和を「保守費用」と表し，計画条件の変動が保守費用や軌道状態に与える影響を分析する。そして，線区条件に応じた経済的な計画条件や計画モデルの拡張，適用法について検討する。

3.2 計画条件が保守費用と軌道状態に与える影響の分析

(1) 使用データと前提条件

保守費用と軌道状態の関係进行分析するために，図 4 に示すエリアの軌道データに対して最適軌道保守計画モデルを適用し，年度保守計画を作成する。ここでは，年間保守日数，ブロック長さ（ブロック長），期集合サイズを変更可能な計画条件として想定する。また，目的関数についても，計画期間中の平均軌道状態の最良化の他，計画期間末の軌道状態を最良化する場合を想定して分析する。なお，1日の保守延長については，基本的には一定（1.2 km）とし，軌道状態としては軌道の上下方向の不整（高低変位）を考慮する。

計画条件をまとめて表 1 に示す。

図 3 MTT 保守費用の例

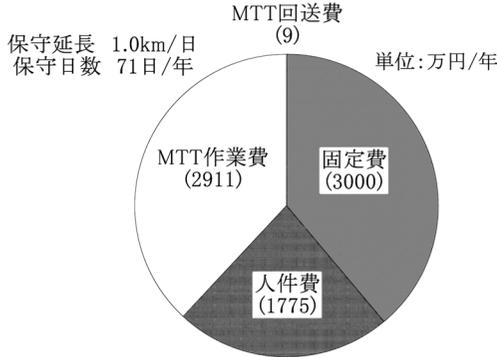


表 1 計画条件

軌道延長	96km
保守基地数	6基地
ブロック長さ	100, 200, 300, 400【実態】, 600, 1200m
1日の保守延長	1200m
年間保守日数	9, 17, 25, 34, 42【実態】, 50, 59, 67, 75日/年
期	1(月), 2(半月), 3(旬), 4(週), 6(5日), 10(3日), 28(日)
軌道状態(平均)	年度開始時1.24mm, 劣化速度0.110mm/年

図 4 適用対象エリア

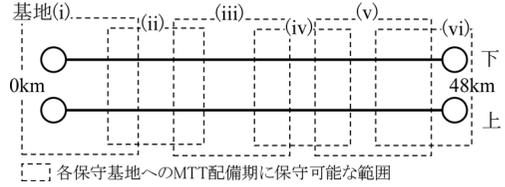
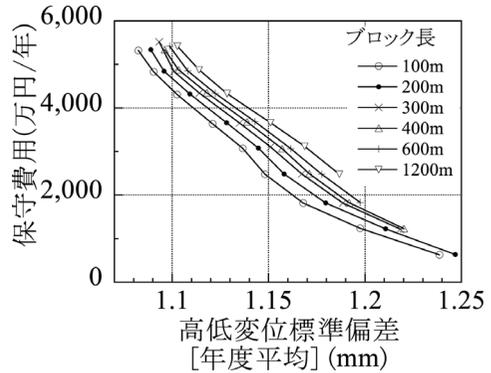


図 5 軌道状態と保守費用



(2) 分析結果

1) 年間保守日数とブロック長

期集合サイズを 6 期 / 月として得られた計画における軌道状態（計画通りに保守した際に予想される高低変位標準偏差の年度平均）と保守費用の関係を図 5 に示す。図から、年間保守日数を増やす、即ち保守費用を増やすと軌道状態は良化し、その関係はやや非線形であることが分かる。また、一定の軌道状態を維持するのであれば、ブロックを短くして状態が悪い箇所を限定的に保守する計画を作成する方が経済的であることが分かる。しかしながら、実際の保守は営業列車の合間（保守間合）に行われるため、保守ができる時間長さに制約がある。よって、1日に複数のブロックを保守する場合、ブロックが短いと回送や段取りの時間が増えるため、特に夜間でも多くの列車が走行するような線区では、1日に多くの箇所や延長を保守できない。このことから、実態を考慮して、ブロック長と1日の保守箇所数を適正な値に設定して分析する必要がある。

表 2 に示すように、保守作業及び付帯作業時間を設定し、図 4 に示したエリアにおける保守基地とブロック間、ブロック間相互の平均距離を用いて推計した必要保守時間を図 6 に示

表 2 必要保守時間算出のための条件

打合せ	10 分	/回
MTT段取り	10 分	/ユニット
MTT回送	0.13 分	/100m
MTT作業	10 分	/100m
時間余裕	30	分

図 6 必要保守時間

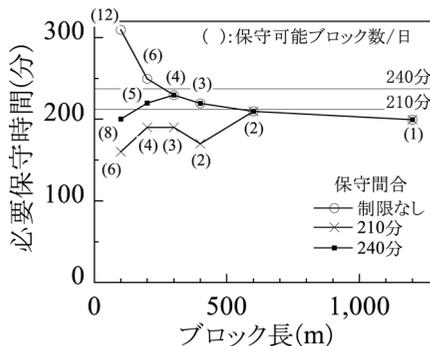


図 7 ブロック長と保守費用

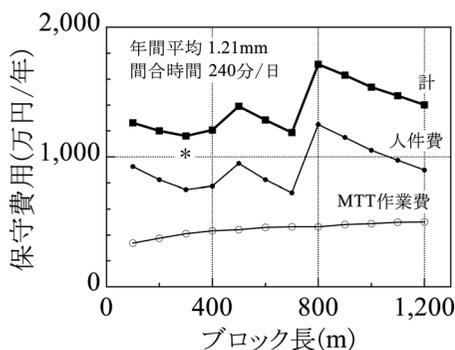
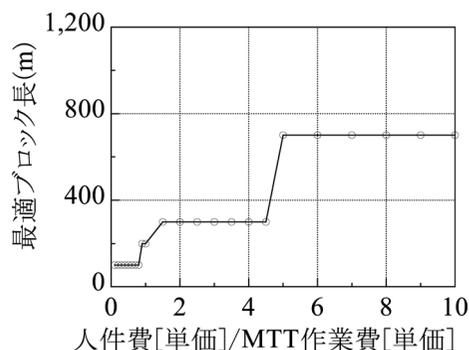


図 8 費用単価比と最適ブロック長



す。ブロックを短くすると必要保守時間が増加し、保守間合が4時間（240分）の場合にはブロック長 100 m×12、200 m×6 ブロック / 日の保守、つまり 1.2 km/ 日の保守は不可能である。同様に保守間合が 210 分の場合には、ブロック長 100~400 m のときに 1.2 km/ 日の保守は不可能である。これらの場合、1 日の保守ブロック数を減らす必要があり、年度内に同じだけの延長の保守を行うためには、年間保守日数を増やす必要がある。

保守間合を 240 分とし、高低変位標準偏差の年間平均値が 1.21 mm 程度となるように、本モデルにより得られた計画におけるブロック長と MTT 作業費、人件費の関係を図 7 に示す。式 (16) から明らかなように MTT 作業費は保守延長が長いと大きく、人件費は保守日数が多いと大きい。つまり、ブロック長に応じて保守日数が変化するため、この図のような関係を得られる。これらの費用の合計はブロック長が 300 m のときに最小であることから、このブロック長の条件で計画を作成するのが適当と考えられる。このエリアでは、1 回の保守延長の実績値の平均値（≒ブロック長）は 400 m 程度であり、得られた結果と近い。

ここで、人件費と MTT 作業費の各単価の比をパラメータとして、図 7 に示した検討と同様の計画条件、方法により保守費用が最小となるブロック長（最適ブロック長）を検討した

結果を図 8 に示す。MTT 作業費の単価に比べて人件費の単価が相対的に小さければ、保守日数が増加しても保守費用の増加に与える影響は小さいため、ブロックは短い方が経済的である。一方、人件費の方が大きい場合には、1 日になるべく多くの延長を保守して保守日数を少なくする方が経済的である。一般に、人件費は昼間より夜間の作業の方が高いため、昼夜を問わずに保守間合を長く確保できる線区では、ブロック長を短く設定した上で、人件費が安い昼間を活用して少ない日数で集中的に保守する計画を作成するのが経済的といえる。

以上より、保守間合が短いため 1 日に多くの延長を保守できない線区では、適切なブロック長を検討して保守計画を作成すると経済的である。一方、保守間合が長く 1 日に多くの延長を保守できる線区では、ブロック長を短くして状態が不良な箇所を限定的に保守し、また少ない日数で保守する計画を作成すると経済的である。鉄道事業者における実際の施策として、平日の昼間の列車を何本か運休して保守間合を長く確保し、少ない保守日数で集中的に保守している線区がある（長谷川（2022））。列車本数が少なく運休による影響利用者数が限定される線区でこのような保守が行われているが、このような保守形態においても、保守が必要な短区間の箇所を厳選した上で、1 日に多くの箇所を保守するのが経済的と考えられる。

2) 期集合サイズ

期集合のサイズも計画の品質に影響を与える。例えば、期が短い（期集合サイズが大きい）と MTT は基地間を頻繁に移動できるため、より良好な軌道状態を維持する計画を得られるが、モデルの規模が大きくなるためにモデルを解くための計算時間は増加すると考えられる。つまり、期集合のサイズは計画の品質と計算時間の両方に影響を与えるため、適用対象に応じて適切に設定する必要がある。図 4 に示したエリアのデータに対して年間保守延長を同じとし、期集合 K^{\max} の大きさを 1（月単位）、2（半月）、3（旬）、4（週）、6（5 日）、10（3 日）、28（日）に変化させて、本モデルにより計画を作成した結果を図 9 に示す。

$K^{\max} \geq 10$ の条件では保守スケジュール作成モデルにおいて PC の汎用ソルバー（Xpress）で計算時間が 7200 秒を経過しても最適解を得られず、7200 秒で計算を打ち切って得られた計画により維持できる軌道状態は $K^{\max}=6$ での結果より悪い。つまり、期のサイズが大きいとモデルが大規模になり、計算時間が増加して品質の高い計画を得にくくなると考えられる。また、実務的には極端に短い期を設定して計画を作成しても、軌道変位の保守日が電力設備等の保守日と競合した場合には、保守日を変更する必要がある、モデルが出力した計画の通りに保守できるとは限らない。よって、短時間で有効な計画を作成するという観点からは、実用上適切な範囲で期の長さを大きく（期集合サイズを小さく）するとよい。但し、期を長くしすぎると解を得られない可能性が大きくなり、本計算例では $K^{\max}=1$ のときに解を得られない。これは、保守スケジュール作成モデルにおける viii) 期別ブロック別保守制約において、高低変位が管理値を超えるロットを含むブロックが複数存在する場合、MTT が

図9 期集合サイズと計画の品質、計算時間

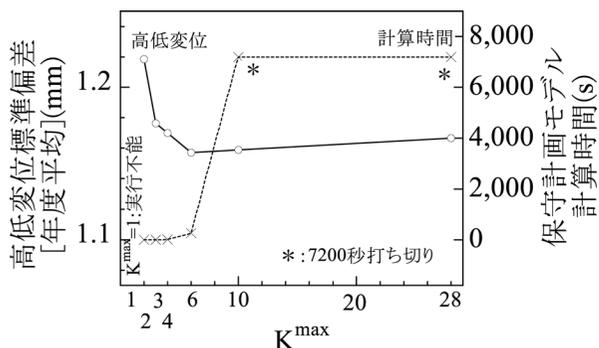
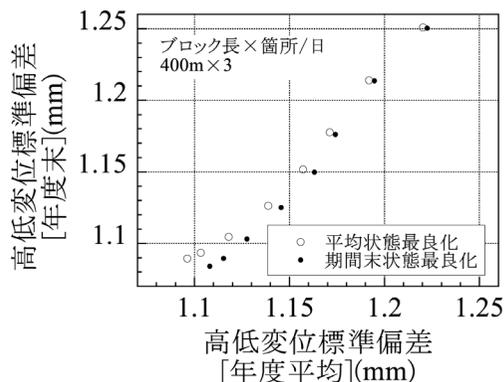


図10 目的関数の差異による影響



保守基地間をある程度自由に移動できないと、当該ブロックの全てを軌道変位が管理値を超過する期までに保守しきれないためである。これまでの研究成果によれば、期集合サイズを3~6程度とすれば、実務上問題ない計画を短時間で得られている (Oyama et al. (2006))。

3) 目的関数

目的関数を適切に選択することも、計画の品質向上には重要である。最適軌道保守計画モデルの目的関数は、計画期間中の平均軌道状態の最良化であったが、軌道状態の良化には列車荷重の変動を減少させ、軌道変位進みを抑制する効果があるため、計画期間末の軌道状態をできるだけよくする保守を何年も繰返すことで、保守量を長期的に削減できる可能性がある。そこで、本モデルの目的関数を計画期間末の軌道状態の最良化として次のようにする。

$$\min. \quad f = \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \Delta S_i^j w_{mji} \quad (17)$$

本式からは、計画期間内であれば、各ブロックにいつ保守しても目的関数の値に差はなく、各ブロックに保守を実施するか否かの選択のみが目的関数の値に影響することが分かる。この結果、目的関数の値が同じ解は多数存在することになるため、汎用ソルバーを用いて解く際には、解探索の過程で暫定解と解空間の上限値とのギャップが1未満となった時点で計算を打ち切り、最適化処理を終了させた。

図4に示したエリアのデータを用い、年間保守延長等を同じ条件として、元のモデルで用いてきた平均状態最良化と、式(17)に示した計画期間末状態最良化の2つの目的関数により作成した計画における軌道状態(平均、年度末)を図10に示す。平均状態最良化のプロットの方が左に存在し、期間末状態最良化のプロットの方が下に存在するのは、目的関数の違いによるものである。しかしながら、その差異は小さいことから、適切な保守延長を設定すれば、元のモデルで用いてきた平均軌道状態を最良化する目的関数であっても、計画期間末の軌道状態の良化と長期的な保守量の削減を可能な計画を得られると考えられる。

図 11 MTT 基地間回送距離

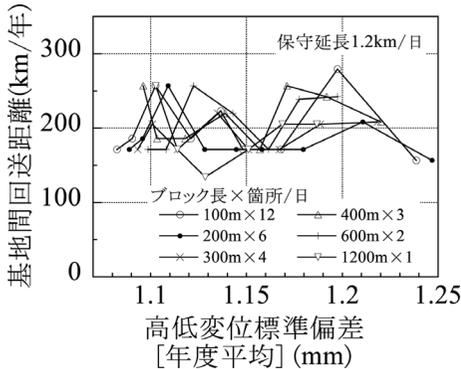
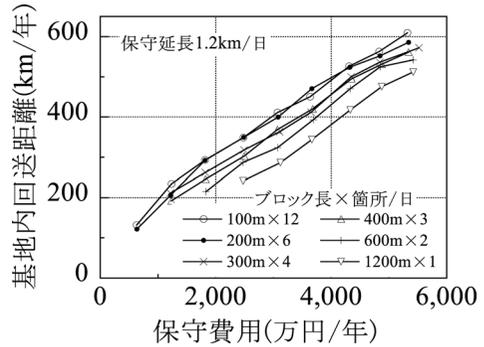


図 12 MTT 基地内回送距離



4) 回送距離に関する考察

1) で作成した計画における MTT の基地間及び基地内回送距離を算出した結果を図 11, 12 に示す。図 12 に示した基地内回送距離については、本モデルでは期単位の保守計画を出力するが、期中におけるブロックの保守順序は出力しないため、各期において基地からの距離が近いブロックの順に保守すると仮定して算出した。

図 11 に示すように、基地間回送距離には保守費用やブロック長に依存した関係は認められない。これは、目的関数に回送距離が含まれていないためである。また、本モデルでは MTT を各期に 1 箇所の基地にしか配備できないため、各期には基地からの保守を担当できる範囲内のブロックにしか保守できない。よって、保守するブロックの数の変化が MTT の基地配備計画に与える影響は小さいため、基地間の回送距離の変化に余り影響しないと考えられる。

一方、図 12 に示すように、保守費用が大きい、即ち保守の延長や日数が多いと保守するブロックの数が増えるため、基地内回送距離は長くなる。また、ブロックが短いとブロック数の増加によりブロック間の移動回数が増えるため距離が長くなる。つまり、図 5 への考察で示したように、保守費用を一定とした場合、ブロックを短くすることは軌道状態の良化に有効であるが、回送距離が長くなり、そのための費用が増えると共に、作業性は低下する。しかしながら、回送費が年間保守費用に占める割合は小さかったことから、こうした作業性の低下さえ厭わなければ、良好な軌道状態を少ない費用で実現できる可能性はある。よって、短いブロックでの保守を可能とする技術や仕組みの検討が保守の経済性向上策として考えられる。例えば、保守における前作業及び後作業の効率化、回送時間の短縮 (MTT の回送速度向上や MTT の運転取り扱い方法の見直しによる短縮) は保守の効率化に有効な方策となる。特に、レールに継目を有する軌道構造が主体の線区では、継目落ちにより高低変位が増大しやすいため、継目周辺だけへの保守を移動しながら行うことが有効と考えられる。近年導入されたミニ MTT (林本 (2019)) や 4 頭式タイタンパアタッチメント (4 頭 TT) を取

保守費用と軌道状態の関係分析に基づく経済的な保守計画の作成法と品質向上策の検討

り付けた軌陸バックホウ（斉藤ほか（2024））のような機械の導入や運用は、上記で得られた知見と整合する。

3.3 保守費用と軌道状態を考慮した多目標計画モデルへの拡張

最適軌道保守計画モデルを用いて保守費用と軌道状態の関係を考慮した保守計画を作成するためには、3.2 1) で示したように、制約条件となる保守延長を様々に変えて計画を作成した上で適切な計画を選択することが考えられるが、最終的に採用する保守計画を作成するまでに多くの手間と時間を要する可能性がある。そこで、保守費用と軌道状態の両方を同時に考慮した保守計画を1回のモデル操作で作成できるようにするために、本モデルを多目標計画モデル（中山ほか（1994））に拡張する。

元の最適軌道保守計画モデルにおける目的関数の値を f 、年間保守延長の値を g とすると、各値のスカラー和を以下のような新しい目的関数とすれば、本モデルを多目標計画モデルに拡張できる。

$$\max. \quad \rho = -\frac{1}{f^s - f^0}(f^s - f) + \frac{1}{g^s - g^0}(g^s - g) \quad (18)$$

f^s, g^s : f, g の十分レベル

f^0, g^0 : f, g の必要レベル

ここで、十分レベルとは理想的な実現値であり、必要レベルとは作成する計画が少なくともこれだけの品質を有する必要があることを表す値である。図4に示したエリアのデータを用いて、最適軌道保守計画モデルの目的関数を式（18）に変更し、必要、十分レベルを様々に変えて得られる保守延長と軌道状態の関係を図13に示す。なお、このときのブロック長は400 mである。

プロット点が曲線上に一列に並んだ形状は、図5の形状に近く、本モデルにより軌道状態と保守費用を同時に考慮した計画をできた。しかしながら、この分析のためには、各々の必要レベル及び十分レベルを様々に設定する必要がある、適切な計画を得るまでに手間を要する。そこで、満足できる解を容易に得るため、式（18）における右辺の2つのスカラーの項に対して次のような重みを与えた形に目的関数を書き換える。

$$\max. \quad \rho' = \frac{w_1}{f^s - f^0}(f^s - f) + \frac{1 - w_1}{g^s - g^0}(g^s - g) \quad (19)$$

w_1 : 軌道状態最小化基準への重み（0～1の実数）

本モデルでは、必要レベルと十分レベルをおおよそ妥当な範囲に設定さえすれば、 w_1 を様々に変えることにより保守費用と軌道状態の両方を同時に考慮した計画を作成できる。ここで、軌道状態の各レベルについては年度開始時の軌道状態（高低変位標準偏差）が1.24 mmであることを考慮して決定すればよい。また、保守量については、例えば前年度の保守

図 13 保守延長と軌道状態

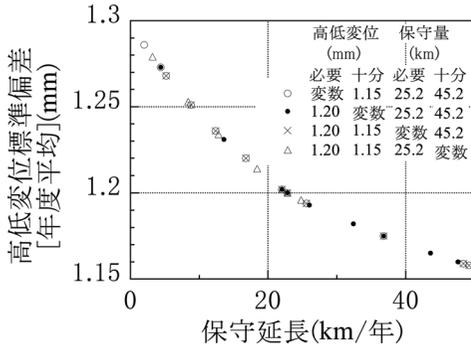
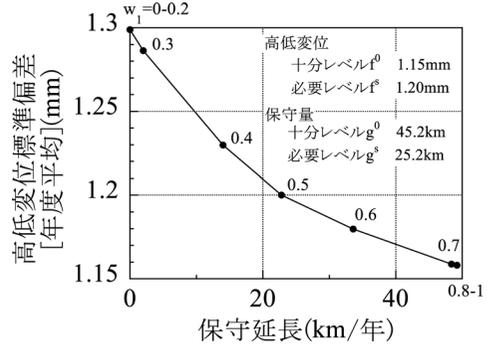


図 14 重みと保守延長, 軌道状態



量や当年度予算に応じた値を設定すればよい。そして、本モデルを解いて得られた計画に不都合があり、計画を作成し直す場合には、重視したい基準の重みを増やすだけで対応できるため、対話型システムの構築に本モデルは適している。

図 4 に示したエリアのデータに本モデルを適用して得られた結果を図 14 に示す。元のモデルの目的関数（軌道状態最適化基準）への重みを増すと保守延長が増加して軌道状態が良化し、重みを減らすと軌道状態は悪化するが保守延長は減少する。つまり、 w_1 の与え方によって、これら 2 つの観点から計画の内容を制御できる。

4 経済性と品質を考慮した新しい保守計画モデルへの発展の方向性

前章では、最適軌道保守計画モデルの計画条件や目的関数を様々に変えることで、モデルの適切な応用法を検討した。一方、近年では、人口減少や働き方の変化、自動車道の整備等による鉄道利用者の減少の他、労働人口の減少や労働嗜好の変化による労働力確保の困難化が鉄道事業の継続において大きな問題になりつつある。特に、労働力の不足は安全で快適な鉄道輸送を提供する基盤に関わるものであるため、保守の機械化、省力化に貢献する各種取り組みが ICT や DX を活用して進められている。よって、これまでに構築した最適軌道保守計画モデルについても、こうした社会動向やニーズに応じて改良、発展させていく必要があることから、本章では経済性と品質を考慮した新しい保守計画モデルへの発展の方向性について検討する。

4.1 簡易な保守計画モデルへの改良

前章に示したように、最適軌道保守計画モデルでは、MTT の運用と保守時期の最適化が可能であり、対象線区全体の平均的な軌道状態の最良化を目的関数としている。よって、本モデルは、軌道変位が管理値を超過する箇所が少なく、軌道変位保守の箇所や時期の選択に

保守費用と軌道状態の関係分析に基づく経済的な保守計画の作成法と品質向上策の検討

比較的高い自由度があるような線区において MTT を効率的に運用し、良好な乗り心地を維持、提供する計画の作成に適しているといえる。一方、軌道状態がそれほど良好ではなく、また保守の日数や費用が少ない線区では、列車の安全運行の確保が重要視され、軌道変位が管理値を超過した、或いは超過する可能性が高い箇所への保守が中心になると考えられる。即ち、少ない費用で信頼性の高い軌道を維持できる保守計画の作成へのニーズが高い。

以上のことから、適切な軌道状態を維持するための保守量の最小値を算出するモデル（最小保守量算出モデル）に最適軌道保守計画モデルを改良することが考えられる。本モデルは、最適軌道保守計画モデルのうち、保守箇所選択モデルを改良し、管理値を超過すると見込まれる全てのロットを保守できるブロック数の最小値を最小保守量として出力する。本モデルの集合及び決定変数については保守箇所選択モデルと同じであるが、制約条件には i) ブロック選択論理制約、ii) ロット別保守制約だけを用いる。ここで、軌道変位が管理値を超過すると見込まれるロットについては、制約 ii) により必ずブロックに含む。目的関数は選択するブロック数の最小化とし、以下のように表す。

$$\min. \quad h = \sum_i v_i \quad (20)$$

なお、「目標 σ 値（軌道変位標準偏差の線区目標値）」のような線区として維持したい軌道状態が別に設定されている場合には、次のような iv) 劣化状態目標値制約を制約条件に追加する。これにより、軌道変位が管理値を超過しない見込みのロットもブロックに選択される。

iv) 劣化状態目標値制約

軌道変位の計画期間中の平均値や計画期間末の値は線区ごとに設定した目標値以下とする。

$$\sum_{i \in L^r} \sum_{x=1}^{i+(N-1)} (1-v_x) \bar{\sigma}_x' + \sum_{i \in L^r} \sum_{x=1}^{i+(N-1)} v_x \bar{\sigma}_x'' \leq N_r \cdot \bar{\sigma}^r \quad (21)$$

$\bar{\sigma}_x'$: ロット i に計画期間中に保守を実施しない場合の計画期間中（末）軌道変位の平均値

$\bar{\sigma}_x''$: ロット i に計画期間中に保守を実施する場合の計画期間中（末）軌道変位の平均値

$\bar{\sigma}^r$: 線区 r の計画期間中（末）軌道変位の目標値

L^r : {線区 r に含まれるロット}

N_r : 線区 r に含まれるロット数

本モデルを図 4 に示したエリアのデータに適用して得られた保守延長と軌道状態との関係を図 15 に示す。ここで、高低変位標準偏差の年度開始時の値（初期値）については、実際のデータに対して 90~110% の範囲で変動させた。制約 iv) については年度平均値により考慮し、またブロック長を 400 m とした。

一定の軌道状態（年度平均の目標値）を維持する場合には、初期値が大きいと多くの保守が必要である。また、目標値を小さくすると保守延長は増加し、最終的には全対象ロットの

図 15 最小保守量算出モデルの適用結果

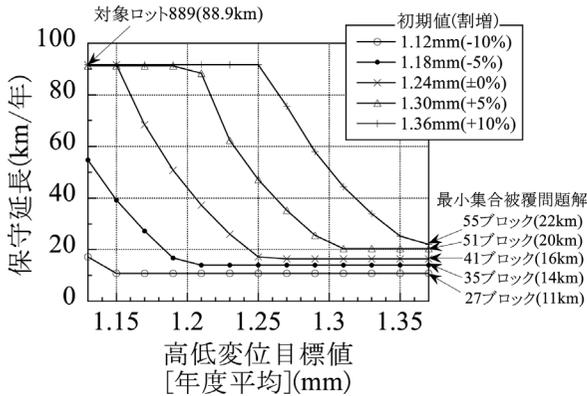
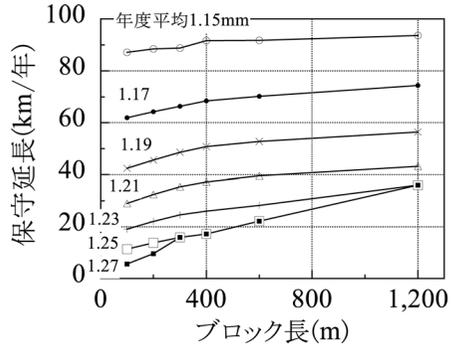


図 16 ブロック長と保守延長



延長 (89 km) に収束する。一方、目標値を大きくすると保守延長は減少するが、これも一定値に収束する。これは、目標値が大きいと制約 iv) は極めて緩い制約となるため、解の存在範囲は制約 ii) により強く制限されるためである。即ち、制約 ii) において指定されたロットだけをブロックに含めばよくなり、制約 iv) で設定される目標値は最適解に殆ど影響しない。

ブロック長と保守延長との関係について、軌道状態の目標値をパラメータとして図 16 に示す。なお、ここでの軌道状態の初期値は 1.24 mm とする。

一定の軌道状態を維持する場合、ブロック長が短い方が保守延長は少なくなる。また、各ブロック長において、設定する目標値が大きいと保守延長は減少するが、特にブロックが長い場合、目標値がある程度大きいと一定の保守量に収束するのは、先述のように制約 iv) が制約 ii) に比べて緩くなるためである。

以上のように得られたブロック数の最小値を保守箇所選択モデルにおける iii) 選択ブロック数上限制約の選択ブロック数上限値に適用し、今度は式 (4) の目的関数に戻した上で、再度モデルを解くことで、最適なブロック集合を得られる。そして、得られたブロック集合に対して保守時期を検討することで、経済的な保守を行える。

4.2 軌道構造や保守方法の改良効果を考慮した保守計画モデルへの改良

(1) 軌道構造の改良

軌道構造が比較的脆弱な中下級線区では、軌道変位保守を減らすためにレールの重量化や木まくらぎのコンクリートまくらぎ化等により軌道構造を強化、改良して軌道変位進みを抑制し、保守量を減少させる施策が検討されることがある。このような施策の検討において多く議論される保守量の削減効果については、4.1 に示した最小保守量算出モデルを用いて定量的に把握できる。なお、こうした検討は、力学モデルに基づく軌道構造の設計法（鉄道総

図 17 高低変位進みと保守量

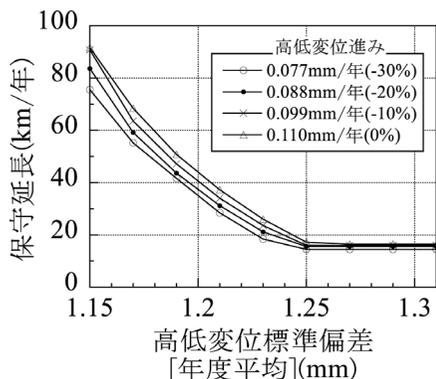
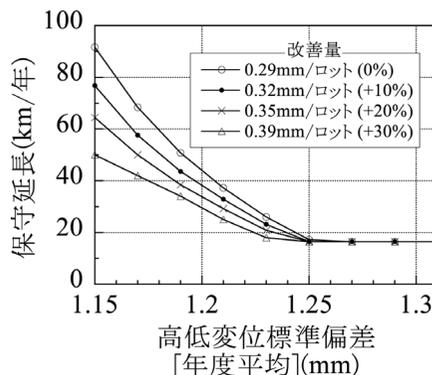


図 18 高低変位保守改善量と保守量



合技術研究所(2012))によっても可能であるが、ここに示す方法は、このような設計法により「軌道構造の改良による軌道変位進みの減少率」を算出し、これを実際の軌道データから得られる軌道変位進みに乗じて軌道改良後の軌道変位進みを計算することで保守量を推定する。このため、力学的アプローチと統計的アプローチを融合させて軌道変位進みを推定し、施策の影響等を高い精度で評価できると考えられる。ここでは、軌道変位進みを抑制する施策の検討を想定し、最適軌道保守計画モデルを図4に示したエリアのデータに適用して保守延長と軌道状態との関係を考察する。

軌道構造の設計法を用いて施策の効果を評価した結果、軌道変位進みが従来に比べて30~0%の範囲で抑制されるという結果を得たと仮定し、全ロットの高低変位進みの実測値をこの範囲で変動させる。このとき得られる軌道状態と保守延長との関係を図17に示す。軌道状態に応じて保守延長は異なるが、一定の軌道状態を維持する場合、高低変位進みが少ないと保守延長は減少する。軌道状態がある程度悪くなくてもよい場合には、vi)劣化状態目標値制約がii)ロット別保守制約に比べて緩い制約となるため、軌道変位が管理値を超過するロットにだけ保守できればよく、保守延長は一定値に収束する。一方、軌道状態をより良好に維持したい場合には多くのロットを保守する必要があるため、保守延長は全対象ロットの延長に近づく。

このように、軌道構造の改良等の施策により軌道変位進みが抑制されることに伴う保守延長の減少効果を具体的に把握することで、施策を検討する担当者は、改良費用と改良効果との関係を考慮して適切な施策を選択できる。

(2) 軌道材料の交換

道床等の材料交換を行うことで、軌道変位保守による改善効果が向上する施策を想定し、その効果を評価する。ここでは、材料劣化を考慮した保守改善量推計モデル等(内田ほか

(1997)) により、保守改善量が0~30%の範囲で増加するという結果が得られたと仮定し、全ロットの保守改善量をこの範囲で変動させる。このとき得られる軌道状態と保守延長との関係を図 18 に示す。

一定の軌道状態を維持する場合、改善量を多く確保できると保守延長は減少し、この傾向は良好な軌道状態を維持する場合に顕著である。本検討でも、軌道を多少悪い状態に維持することが許容されるのであれば、軌道変位が管理値を超過するロットにだけ保守できればよい。そのため、保守延長は改善量の変動幅に関係なく一定値に収束する。

このように、軌道材料の交換による保守効果の向上に伴う保守延長の減少効果を具体的に把握することで、施策を検討する担当者は、材料交換費用と材料交換効果との関係を考慮して適切な施策を選択できる。

4.3 保守区間の始終点出力の高精度化

最適軌道保守計画モデルでは、軌道変位の管理、予測単位はロット(100 m 区間)であるため、保守区間として出力されるブロックはロットの整数倍(N 倍)に対応した「 $100 \times N$ 」m を基本長さとして出力される。一方、実際の保守は、介在する設備や線形、軌道変位波形等の条件を考慮して作業区間(始終点)が1 m 単位で決められた上で行われる。このため、現状では計画モデルの出力をそのまま実際の保守計画に使うことはできず、担当者が始終点を決定する作業が必要である。よって、保守の省人化の観点からは、保守計画モデルが上記条件を考慮して1 m 単位の高精度で保守区間を出力できることが望ましい。そこで、本モデルを活用、改良して、保守の始終点出力を高精度化するための方法を検討する。

(1) 考慮する要因

保守区間の始終点を高精度に出力するために考慮する必要がある要因を整理すると、「①地上側要因、②軌道変位波形、③作業間合」に大きく分けられる。

①地上側要因

本要因には、線形や介在設備が考えられる。線形については、緩和曲線の途中を始終点とすると保守後の線形を適切に作成するのが難しくなるため、これを考慮する必要がある。一方、介在設備については、例えば無道床の橋梁や踏切は保守不能箇所であるため、その始末端付近を保守の始終点として設定することになる。一般に、保守不能箇所は台帳としてデータベース化されており、これを考慮して始終点を検討できる。但し、市街地を通り、踏切が多い線区等では、踏切に挟まれた短い保守可能区間が連続的に存在する場合がある。こうした区間を保守する際、保守の必要な区間が幾つか近接している場合には、保守時期を合わせるといった対応も必要である。

②軌道変位波形

軌道変位波形は車両の走行時の挙動の入力になるものであり、軌道変位の形状によって車両は様々に応答する。軌道変位管理の主な目的は、車両の走行安全性（脱線防止）と乗客の快適性（乗り心地）の確保であるため、軌道変位の形状が車両の挙動に与える影響を評価し、その挙動の改善に有効な範囲の軌道変位を保守するのが効率的である。このような軌道変位波形を入力して車両挙動を推定するために様々なシミュレーションツールが開発されており、汎用的な製品も存在する。そこで、軌道変位波形を入力したシミュレーション結果を用いて車両挙動の改善に有効な保守区間の始終点を検討することができる。このとき、保守後の軌道変位波形を予測できるのであれば、これを入力とした車両走行シミュレーションを行い、保守による車両の挙動の改善が十分に期待できることを確認できるとよい。

③保守間合

始終点間の距離が長すぎると、保守に長時間を要し、保守作業後にMTTを基地へ回送する時間が不足してしまうため、始終点は保守間合や回送に要する時間等を考慮して出力する必要がある。ここで、2.1で述べたように、最適軌道保守計画モデルでは適切なブロック長を予め定めてから計画を検討するため、その際に保守間合を考慮することができる。よって、このブロック長を基本としながら高精度な始終点を検討することで、極端に長い保守区間の出力といった問題は発生しないと考えられる。

以上のことを踏まえて、保守区間の始終点を高精度に出力できるように、以下の形で最適軌道保守計画モデルを活用することが考えられる。

(2) モデルの構造

①保守不能箇所を考慮したロットグループの作成

保守不能箇所の台帳データに基づいて、ロットの始終点を保守不能箇所の始末端に一致させる。これにより、ロットを結合して作成するブロックの始終点を保守不能箇所の始末端と一致させられるようになるため、出力される保守区間の始終点の高精度化が期待される。なお、保守不能箇所を考慮したロットグループの作成には、既存の手法（齊藤ほか（2024））を活用できる。

②保守区間選択モデルにおけるブロック長の上限の考慮

従来の保守区間選択モデルでは、i) ブロック選択論理制約においてブロックを作成する連続ロット数の上限を設定する。ここでは、①の処理を行うことで各ロットの長さが必ずしも100mとならないことを考慮して、連続ロット数ではなく、ブロックの延長が上限を超えないように制約し、実行可能な長さのブロックを作成するようにする。

③ブロックの前後区間を含む軌道変位波形を入力した車両運動シミュレーション

保守区間として選択されたブロックについて、その前後の一定延長を含む軌道変位波形を車両走行シミュレーションに入力し、車両の応答（特に脱線係数、輪重減少率、車体動揺加速度）を計算により求める。一般に、車両の挙動は軌道変位の他、速度等の影響も受けることから、シミュレーションでは検討対象とするブロック付近での実際の運転条件を考慮する必要がある。この結果から得られる車両の応答が顕著な区間と保守時の軌道変位波形の取り付けの容易性を考慮して、保守区間を設定する。この具体的な区間の設定については、明確な基準により定めることが若干難しいと予想されるため、AIの活用が考えられる。なお、本シミュレーションにおいては、直近に測定された軌道変位波形を入力とする他、軌道変位波形の予測が可能であれば、計画期間末の予測波形を用いて検討することで、より実効性の高い保守区間を決定できる。更に、保守後の軌道変位波形も予測できるのであれば、保守による車両の挙動の改善が十分に得られそうであるかを確認した上で、保守区間を決定できる。

以上のように計画モデルを活用することで、現状の計画モデルで必要だった出力から実際の計画への手直し作業が軽減されるようになる。なお、上記②の処理により出力される保守区間はロットやブロックの始終点とは必ずしも一致しなくなることが考えられる。この結果、平均軌道状態を最良化する目的関数ではロットの軌道変位を用いて演算するため、計画モデルで出力された保守区間に全長が含まれないロットが生じる可能性がある。そのため、このようなロットでの保守改善量の推計法を検討することが課題である。

4.4 新たな保守用機械を考慮した保守計画モデルへの改良

最適軌道保守計画モデルでは、MTTによる保守を想定し、その運用における制約条件等を考慮して軌道変位保守計画を作成できる。一方、軌道変位保守では、MTTによる保守の他、人力によるTT保守が行われているが、近年では労働条件の改善や省力化を目的としてTT保守の機械化が進んでいる。例えば、従来のMTTより作業速度が遅い等、性能は劣るが導入費用は安い小型MTT（林本（2019））や4頭TT（長谷川（2023））といった機械が軌道変位保守に使われるようになってきている。よって、計画モデルをこうした新たな保守用機械の運用にも対応できるように改良することが考えられる。

小型MTTの使用条件を考慮した計画モデルについては、最適軌道保守計画モデルの計画条件を小型MTT向けに設定することで計画の作成を試み、従来の大型MTTを想定して作成した計画と比較した例が存在する（西島（2020））。また、4頭TTをMTTと併用して運用することを考慮した軌道保守計画モデルが構築され、その有効性が検証されている（斉藤ほか（2024））。よって、これらの計画手法や計画モデルを適用することで、新たな保守用機械を考慮した保守計画を作成できる。しかしながら、これらの機械の導入の考え方は鉄道事

保守費用と軌道状態の関係分析に基づく経済的な保守計画の作成法と品質向上策の検討

業者によって異なるため、様々な条件下での適用事例を蓄積し、汎用化していくことが課題である。また、これらを含む新しい保守用機械については、省力化を目的として今後も様々な種類のもので導入されると予想されることから、適切な導入対象線区、運用条件、計画作成条件、保守効果評価等の検討に適用可能なモデルに改良することも課題である。特に、地方の閑散線区では、3.2で述べたような平日の昼間に集中的に保守する形態が、今後は更に増えると考えられるため、通常の保守と集中保守の両形態を考慮した計画モデルに改良することが考えられる。例えば、軌道変位が管理値を超える可能性が高いロットを含むブロックについては通常の保守の対象とするが、可能性が低いロットだけで構成されたブロックについては集中保守の対象とするようなアルゴリズムが考えられる。これにより、保守形態の適切な組み合わせ方の検討が可能になると考えられ、従来のモデルが施策検討モデルに発展するものと期待される。

4.5 保守計画の評価指標の改良

最適軌道保守計画モデルの目的関数は、計画期間中の平均軌道状態の最良化であったが、この指標を線区の特성에応じて様々に変えることが考えられる。例えば、幹線や特急走行線区といった乗り心地を重視する線区については、軌道変位を乗り心地に対応する指標に変換して、目的関数にすることが想定される。一方、低速で列車の走行安全性の確保が優先されるような線区については、脱線事故や輸送障害の発生確率を評価指標とし、これを最小化する目的関数にすることが想定され、こうしたリスクを考慮した計画モデルについては検討事例がある（三和ほか（2019））。しかしながら、1台のMTTの担当エリア内に、上記のような様々な指標を用いるのが適当な線区が混在する場合は考えられる。そのため、線区の特性に応じて適切な評価指標や目的関数を選択できるだけでなく、種々の評価指標を組み合わせられるようにして、特性の異なる複数の線区を担当するMTTを対象とした軌道保守計画を最適に作成できるようにすることが課題である。具体的には、3.3で述べたような多目標計画モデルの応用の他、計画モデルを階層化して各線区に対応した評価指標、目的関数に基づいて各線区の保守時期を先に決めた上で、保守箇所、時期を線区別に検討するといった方法が考えられる。

5 まとめと将来課題

最適軌道保守計画モデルを用いて計画条件が保守費用と軌道状態に与える影響を分析し、経済的な軌道保守計画の作成法と品質向上策を検討した。本研究により得られた知見を以下にまとめる。

最適軌道保守計画モデルを用いて保守費用と軌道状態との関係を分析した結果、1日に多

くの延長を保守できるのであれば、ブロックを短くして計画を作成すると経済的であるとの結論を得た。また、保守間合に応じたブロック長の最適化により経済的な計画を作成でき、MTT 作業費の単価に比べて人件費の単価が相対的に小さければ、ブロックを短く設定して計画を作成することが経済的であるとの結論を得た。更に、多目標計画モデルを構築し、保守費用と軌道状態の両方を同時に考慮して有効な保守計画を作成できることを示した。

一方、経済性と品質を考慮した新しい保守計画モデルへの発展の可能性についても検討した。軌道状態がそれほど良好でなく、軌道変位が管理値を超過しないような管理を主に行う線区を想定して最小保守量算出モデルを構築し、軌道変位が管理値を超過するロットを全て網羅する最小ブロック数、及び最適なブロック集合を選択できることを示した。また、軌道構造の強化等により軌道変位進みを抑制する施策や材料交換等によって保守改善量を増やす施策による保守量の減少効果を把握し、各種施策の妥当性の評価に活用できることを示した。更に、保守区間を 1 m 単位で出力可能なモデルへの改良、各種保守用機械の導入や線区に応じた適切な計画評価指標の導入を想定したモデルへの発展可能性を示した。

最後に、本研究により得られた課題を以下に示す。

保守費用と軌道状態との関係分析においては、軌道状態の悪化に伴う利用客の減少等、機会損失に相当する費用を考慮しなかった。また、著大な軌道変位の発生による輸送障害、脱線事故の発生や、これらに関係するリスクは軌道状態に応じて増減すると考えられるが、提案したモデルではこれを考慮していない。よって、保守費用と軌道状態の関係だけでなく、計画の内容が影響する対象とその範囲を考慮した総合的な評価に基づく保守計画モデルの構築が課題である。更に、軌道変位保守計画の出力、作成だけを対象とするのではなく、軌道改良や材料交換の計画の出力も可能なように軌道の LCC モデル（松本（2024））と連携して長期的な経済性を考慮した保守計画を作成できるようなモデルへの発展も課題である。

参 考 文 献

- 長谷川恒平（2022）「線路集中メンテナンス日の設定」, 新線路, 第 76 卷, 第 4 号
 長谷川恒平（2025）「JR 北海道における集中的な修繕工事の取組み」, 新線路, 第 79 卷, 第 9 号
 長谷川敏基, 島田直晃（2023）「重機械を活用した効率的なまくらぎ更換の施工」, 日本鉄道施設協会誌, 第 61 卷, 第 1 号
 林本和也（2019）「小型 MTT による軌道整備の効果検証」, 新線路, 第 73 卷, 第 3 号
 河西智司, 三和雅史, 近藤篤, 三木一巨（2004）「MTT 軌道保守計画モデルの試行結果」, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集第 4 部
 栗山金弥（2005）「MTT によるつき固め効果の研究」, 新線路, 第 59 卷, 第 1 号
 近藤邦弘, 井上陽一（1994）「東海道新幹線における施設管理システムの現状」, 日本鉄道施設協会誌, 第 32 卷, 第 8 号
 三和雅史, 石川達也, 大山達雄（2001）「軌道状態推移予測モデルの構築と最適保守計画作成のた

保守費用と軌道状態の関係分析に基づく経済的な保守計画の作成法と品質向上策の検討

- 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
- Masashi Miwa, Tatsuo Oyama (2004) "All-integer Type Linear Programming Model Analyses for the Optimal Railway Track Maintenance Scheduling", OPESEARCH, Vol. 41, No. 3, Operational Research Society of India
- 三和雅史, 大山達雄 (2006) 「最適軌道保守計画モデルによる各種決定要因間の相互関連分析」, 2006年度日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集
- 三和雅史, 大山達雄 (2013) 「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, 第 69 卷, 第 2 号
- 三和雅史, 大山達雄 (2019) 「列車脱線事故に関するリスクを考慮した軌道保守計画最適化モデルの構築と検証」, 土木学会論文集 D3, 第 75 卷, 第 11 号
- 三和雅史, 西島悠太, 矢坂健太, 松本麻実, 山田文昭, 大山達雄 (2021) 「鉄道線路の道床交換用保守用車の複数台運用を考慮した道床交換計画モデルの構築と実証分析」, 土木学会論文集 D3, 第 77 卷, 第 3 号
- 松本麻美 (2024) 「ライフサイクルコストを最小化する軌道のメンテナンス手法」, JREA, 第 67 卷, 第 10 号
- 百崎博, 近江武志 (1994) 「保線のデータ処理とその活用システム——施設(保線)保守管理サブシステムの構築と今後の方向——」, 日本鉄道施設協会誌, 第 32 卷, 第 8 号
- 中山弘隆, 谷野哲三 (1994) 「多目的計画法の理論と応用」, 計測自動制御学会
- 西島悠太, 三和雅史 (2020) 「MTT 保有台数の最適化及び MTT 性能を考慮した軌道保守計画」, 日本鉄道施設協会誌, 第 58 卷, 第 5 号
- 大竹敏雄, 川崎祐征, 青木衛市, 佐藤吉彦 (1997) 「軌道管理システム TOSMA の開発」, 鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL'97) 講演論文集
- 大山達雄, 田村浩之, 佐野貴子 (1999) 「郵便局の置局配置に関する調査研究」, 郵政研究所月報
- 齋藤八郎, 小倉英章 (1989) 「P 値管理のための MTT 投入計画システム」, 鉄道総研報告, 第 3 卷, 第 10 号
- 齊藤大樹, 坪川洋友 (2024) 「4 頭タイタンバに対応した軌道変位保守計画策定支援システムの開発」, 日本鉄道施設協会誌, 第 62 卷, 第 9 号
- 佐藤欽也 (2001) 「昼間拡大間合による集中機械化作業への取り組み」, 新線路, 第 55 卷, 第 7 号
- 曾我寿孝, 平野康孝 (2002) 「山陰高速化軌道工事と開業後の軌道管理」, 土木学会第 57 回年次学術講演会
- 田中宏昌, 磯浦克敏 (1998) 「東海道新幹線の保線」, 日本鉄道施設協会
- 垂井晃一 (2011) 「保線管理システム (TRAMS) を活用した設備管理業務」, 日本鉄道施設協会誌, 第 49 卷, 第 10 号
- Tatsuo Oyama, Masashi Miwa (2006) "Mathematical Modeling Analyses for Obtaining an Optimal Railway Track Maintenance Schedule", Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, Vol. 23, No. 2
- 鉄道総合技術研究所編 (2012) 「鉄道構造物等設計標準・同解説-軌道構造」, 丸善
- 内田雅夫, 三和雅史 (1997) 「材料劣化を考慮した軌道変位経時変化の予測モデル」, 鉄道総研報告, 第 11 卷, 第 2 号

付記 本稿は、東京経済大学 2024 年度個人研究助成費（受給番号 24-28）による研究成果の一部である。

また、本稿での分析に用いたデータの提供にご協力をいただいた北海道旅客鉄道株式会社に厚く御礼を申し上げる。