

鉄道線路保守計画の最適化システム

三和 雅史, 大山 達雄

バラスト軌道上を列車が繰り返し通過すると、列車荷重により道床バラストや路盤が変形するために、軌道面の不整が徐々に大きくなる。この不整が大きくなると、列車の走行安全性や乗り心地が悪化するため、限られた軌道保守費や保守用機械などの資源を有効に活用して軌道を保守し、適切な状態を維持していくことが重要である。本稿では、このような効率的な保守の実現を支援するために開発し、実用されている軌道狂い保守計画支援システムを紹介する。

キーワード：鉄道，設備保全，整数計画モデル，スケジューリング

1. はじめに

我が国における鉄道線路（軌道）の多くは、レールおよびまくらぎの下に道床（バラスト）を敷いた軌道である。この軌道は施工時の作業性や経済性には優れているが、列車の繰返し通過により、図1に示すよう



図1 軌道狂い



図2 軌道検測車（JR 在来線）

な軌道面の不整（軌道狂い、または軌道変位）が徐々に成長し、車両の走行安全性や乗り心地が悪化する。このため、鉄道事業者は軌道検測車（図2）などにより定期的に測定した軌道狂いデータに基づいて、保守を計画、実施している。この軌道狂い保守は、主としてマルチプルタイタンパ (MTT) という線路上を自走する機械（図3）により行われるが、軌道は何10 km、何100 kmにも及ぶ線状構造物であるため、1カ所にかかる保守費用がわずかなものであっても、全体では膨大な費用になる。このため、安全で快適な軌道状態を継続的に維持していくためには、限られた軌道保守費や保守用機械等の資源の有効な活用が重要である。

以上のことから、効率的な保守の実現を支援するために、最適化技術を活用して開発し、実用されているのが「軌道狂い保守計画支援システム」[1], [2]である。本システムには、図4のように安全性および乗り心地



図3 MTT

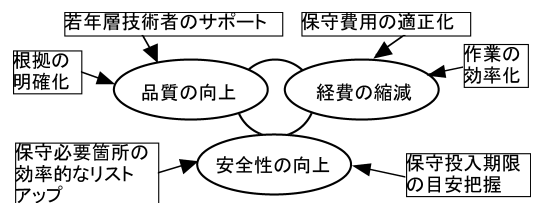


図4 軌道狂い保守計画支援システムの特徴

みわ まさし
公益財団法人鉄道総合技術研究所
〒185-8540 国分寺市光町 2-8-38
おおやま たつお
政策研究大学院大学
〒106-8677 港区六本木 7-22-1

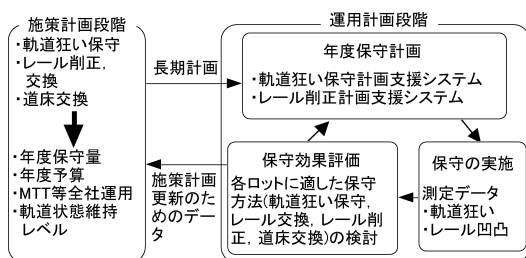


図5 軌道狂い保守計画支援システムの概略

(品質)の確保と経費の縮減を両立させた計画の作成を支援することが期待される。一般に、保守計画には、鉄道事業者の本社等において長期的に最適な計画を検討する「施策計画段階」と現業機関において日常的な保守計画を検討する「運用計画段階」がある(図5)。運用計画段階では施策計画を考慮して計画を作成し、また蓄積したデータにより施策計画を逐次見直すことで、図5の関係を継続的に維持、発展させていくことが重要である。本稿で紹介する軌道狂い保守計画支援システムは、運用計画段階において用いられるシステムである。

2. 軌道狂いの管理

一般に、測定された軌道狂いは、図6のように波形として表し、その状態が評価される。ここで、特に上下方向の軌道狂いは「高低狂い」と呼ばれる。この波形の変動が大きいと状態が悪い(劣化が大きい)と考えられることから、ある一定の延長(ロット)のデータから算出した標準偏差等が劣化指標として用いられる。この場合、図7に示すように、標準偏差は時間とともに増加(劣化)し、保守によって減少するというサイクルを繰り返すことになる。ただし、保守を行っても軌道狂いは完全にならず、不完全に回復するのが軌道狂い保守の特徴である。このような軌道狂い管理においては、保守を適切な時期に行い、線区全体の軌道状態を良好に維持できるように保守計画を作成することが重要である。

3. 軌道狂い保守計画支援システム

図8は1台のMTTの担当エリアの例である。MTTは(i)~(vi)の保守基地を移動しながら保守必要箇所に対して保守を行う。この保守計画の作成作業の効率化や計画の最適化に関しては、これまでも多くの研究がなされてきた。例えば、軌道狂い検測結果はデータベース化され、任意の箇所の劣化状態を容易に把握できるようになった。また管理上の目標値を超える軌道

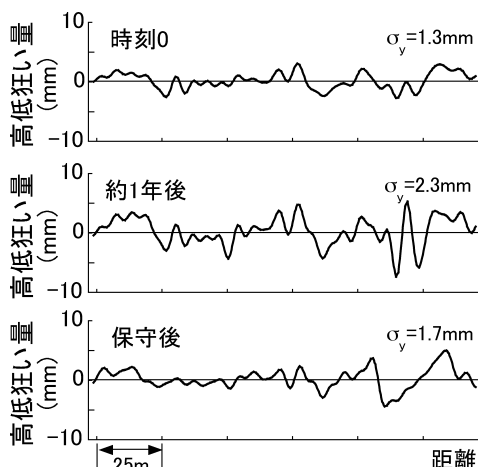


図6 軌道狂い波形の変化

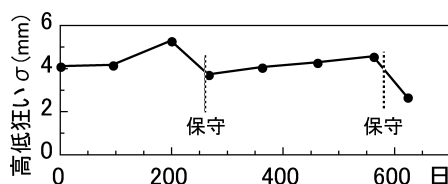


図7 高低狂い標準偏差の推移例

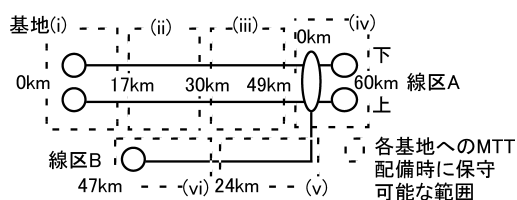


図8 MTTの担当エリアの例

狂いが観測された箇所を出力するシステムも開発された。しかしながら、MTTの運用等に関わる制約も考慮した、より具体的な保守計画については、依然として現場の実状を熟知した担当者が経験等に基づいて作成していたため、計画の作成に多くの手間と時間を要し、また計画の妥当性の客観的な評価が難しいという問題があった。

このことから、最適軌道狂い保守計画モデルを構築し、これに基づく計画を容易に作成するための軌道狂い保守計画支援システムを開発した。本システムは、軌道狂い推移履歴データに基づいて将来の軌道狂い推移を予測し、軌道状態が悪い、あるいは悪化する可能性が高い区間を選定し、軌道狂い保守計画(年度計画)を作成する。

以下では、このモデルおよびシステムの概要を示す。

(1) 最適軌道狂い保守計画モデル

本モデルは、線区および保守基地レイアウトと各ロットの軌道狂い検測データ、計画作成上の制約条件を入力データとし、MTT 配備計画（各期〔週や旬等〕の配備基地）と保守実施計画（各期の保守箇所）を出力する（図 9）。ここで、MTT での保守はある程度長い区間に対して行われることから、計画対象線区を図 10 に示すロット、ユニットという単位に分けて計画を検討する。ロットとは 100 m 区間の軌道狂い管理単位であり、標準偏差を用いて軌道狂いの状態を評価する。ユニットとは連続する N 個のロットの集合であり、出力する計画での保守作業単位である。

目的関数は軌道狂い標準偏差の計画期間中平均値の最小化である。ここで、軌道狂い標準偏差と保守改善量とは線形の関係にある [3] ことから、本目的関数は保守改善量と保守後～計画期間終了時の期間の積の最大化と同値になる。よって、ユニット選択モデルによって保守改善量が大きく見込まれるロットをできるだけ多く含むようにユニットをあらかじめ作成した後、保守スケジュール作成モデルを解く。各モデルの概要を以下に示すが、いずれも決定変数を整数とする 0-1 型整数計画モデルである。

ユニット選択モデル

本モデルでは、総保守量を選択ユニット数の上限値としてあらかじめ与え、この制約条件の下で、保守改善量が大きなロットをできるだけ多く含むようにユニッ

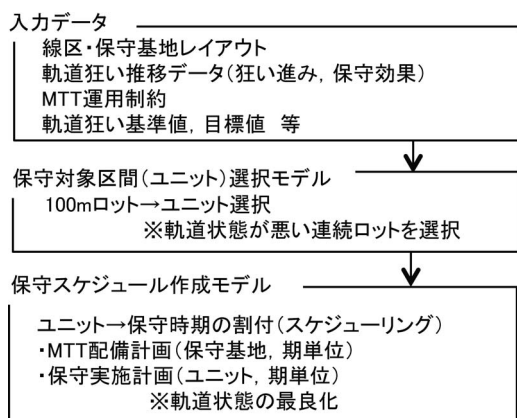


図 9 モデルの構成

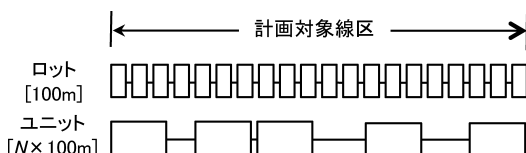


図 10 ロットとユニット

トを選択する。本モデルにおける決定変数の対象はロットの集合であり、連続する N 個のロットからなるユニットを選択する場合に連続区間を開始するロットを決定変数とする。また、目的関数はユニットに含まれるロットの保守改善量の総和の最大化とする。主な制約条件には、次のようなものがある。

i) 選択ユニット数上限制約

総保守量の上限制約として、選択するユニット数の上限値を与える。

ii) ロット別保守実施制約

軌道狂いが計画期間中に目標値を超過するロット等についてはユニットに含む。

保守スケジュール作成モデル

本モデルは 1 台の MTT を対象に、各保守基地への配備時期と対象ユニットの保守時期を決定する。集合として月集合、期集合、保守基地集合、ユニット集合を設定する。決定変数は MTT を各保守基地に配備する時期と配備時期に保守を実施するユニットを決定する 2 種類が存在する。また、目的関数は軌道狂い標準偏差の計画期間中平均値の最小化とする。主な制約条件には、次のようなものがある。

i) 期別保守ユニット数上限制約

各期の保守ユニット数の上限値を与える。

ii) ユニット別保守回数上限制約

各ユニットへの保守は期間中に最大 1 回とする。

iii) 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制約する。

iv) 期別ユニット別保守実施制約

計画期間中に軌道狂いが上限値を超過するロットを含むユニット等について指定期間中に必ず保守する。

(2) 実証分析

本モデルに実際の線区データを適用して軌道狂い保守計画を作成し、計画どおりの保守を行った場合の軌道状態の推移をシミュレーションと現地試験により分析した。

使用データと前提条件

過去のある年度の保守計画を本モデルにより作成し、計画どおりの保守を実施した場合の軌道状態推移をシミュレーションにより推定した。ここでは、過去 2 年分の高低狂い検測データを用いて計画対象年度の軌道状態の推移を推定した。また、当時の保守実績どおりの保守を行った場合の軌道状態についても同様の方法で推定し、モデル解に基づく推定結果と比較した。な

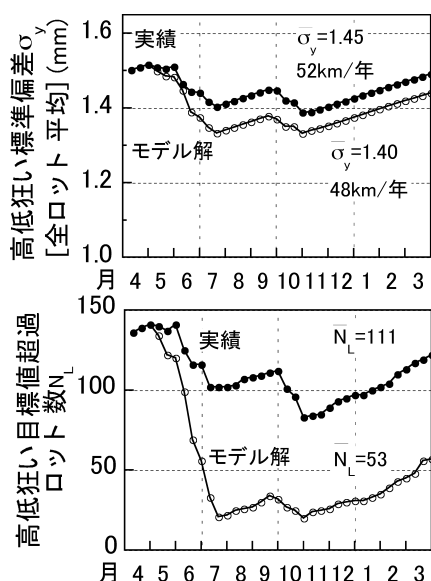


図 11 モデル解と実績の軌道状態の推移比較

お、計画の作成においては当時の保守延長等の条件を用いた。

シミュレーション分析

モデル解および当時の保守実績どおりに保守した場合の軌道状態の推移を図 11 に示す。高低狂い標準偏差はモデル解のほうが実績より小さく推移し、年度末には開始時より約 7% 改善する。目標値を超過する高低狂いを有するロットの数（目標値超過ロット数）の傾向も同様であり、年度末におけるモデル解での値は実績の約半分である。

以上から、本モデルを用いることで従来より効率的な保守計画を作成できたと考えられる。

現地試験

本モデルで作成した計画に基づく保守を実際に行った。試験前後の軌道状態、保守量の推移を図 12 に示す。

開始後、保守量は年々減少したが軌道状態は良化した。また、軌道状態は開始前には下り線のほうが悪かったが、開始後には上下線とも同程度となった。これは、相対的に状態が悪い下り線に保守が多く実施されたためである。よって、モデル解に基づく保守を行ったことにより、上下線とも軌道状態が良化したのに加え、上下線間における軌道状態の格差も解消されたと考えられる。

(3) 軌道狂い保守計画支援システム

システムの概要

本システムは、前述の計画モデルに基づいて保守計画を容易に作成するためのものであり、計画作成のた

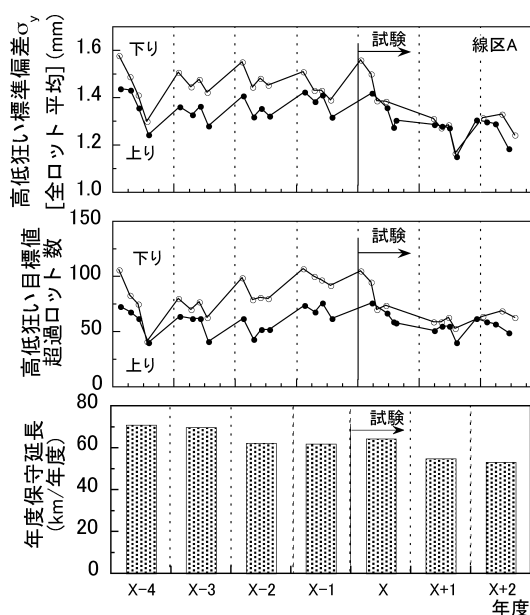


図 12 試験結果

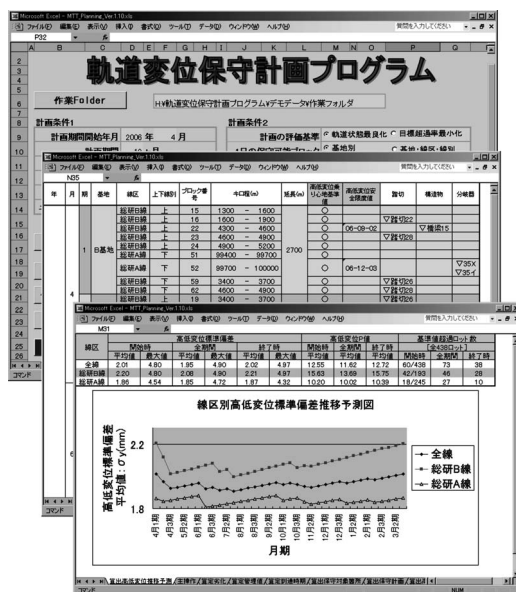


図 13 システムの画面表示例

めの全操作を Excel 上で行うことができる。画面例を図 13 に示す。なお、モデルを解くための最適化計算には、NUOPT [(株) 数理システム社] を使用している。

鉄道事業者での活用状況

現在、本システムは一部の JR で使用されており [4]、現業機関の担当者は本案を参考に最終的な計画を作成している。つまり、本システムで作成した計画を、そ

のまま実行に移すのではなく、最終的な計画は担当者が決定するという運用がなされている。

システムの実装と考察

以上は、最適化技術を現場に展開して業務の効率化が図られた事例であるが、導入に際してなされた多くの議論の中から得られた、最適化モデルを実用化するのに有効な知見を以下に簡単に示す。

① 従来のやり方でも何とかなるという実状

担当者が頑張れば対応できる従来の仕組みは、特段の追加コストもかからず、今後も最適な方法に見える。軌道保守についても、長い歴史の中で積み重ねられたノウハウにより、適切な軌道状態が維持されてきた実績がある。ところが、その方法には技術伝承等の問題が内包されていることから、その点を明確にしてから議論を始める必要がある。

② 最適解は必須ではない

長い計算時間を経て最適解に到達するよりも、ある程度のレベルの解を短時間で得られれば、十分な場合がある。本モデルの導入においても、ほどほどに納得感のある解を短時間で出力できることが重要であった。

③ モデル依存に伴う現場の技術レベル低下の懸念

本モデルでは100m単位で保守箇所を出力するのに対し、実際には曲線や踏切、分岐器等の介在設備を考慮して保守作業の始終点が決められる。こうした細部まで考慮したシステムを作ると、担当者がそれに頼りすぎて、実際の軌道状態やデータを自らで確認して判断する技術力、すなわち現場の技術レベルの低下への懸念が生まれる。よって、根本的なところを人が確認、関与する仕組みの中にモデルを位置づけなくてはならない。

④ ユーザの将来計画との整合性

モデルは、ユーザが描いている将来の業務のあり方の中で効果的に位置づけられる必要がある。本モデルの導入検討時期は、保守作業のアウトソーシングが進んだ時期と重なったため、外注時の手順の中に本モデルの使用を含めることが検討された。

⑤ モデル導入効果の波及への期待

モデルの導入効果は、広範囲であることが望まれる。本モデルは、限られた保守量を有効に使うという効率性、経済性を指標としているが、先掲の図4に示したさまざまな効果も期待できる。特に本モデルの導入検討時期には、コンプライアンスへの関心が高まっていたことから、システム導入に伴う違反リスクの低減も効果の1つとしていた。

⑥ メインシステムの置き換えとの同期

最適化モデルを活用したシステムの導入は、それ単独でなされるとは限らない。もともと各業務向けに存在するマネジメントシステムは、定期的に更新の時期を迎える。そのタイミングに合わせて魅力的なシステムを提案することは、実用化への近道である。

4. おわりに

以上に、軌道狂い保守計画モデルの概要等を示したが、本モデルでは、どのロットも保守により軌道狂いは必ず改善すること、また1年を通して軌道狂い進み

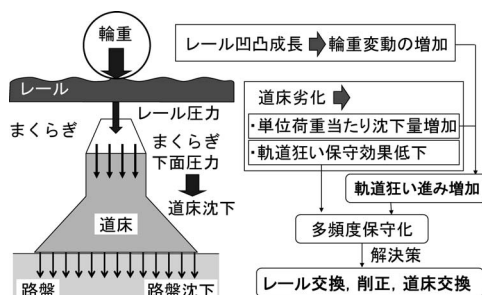


図14 材料劣化が軌道狂い保守の多頻度化に与える影響

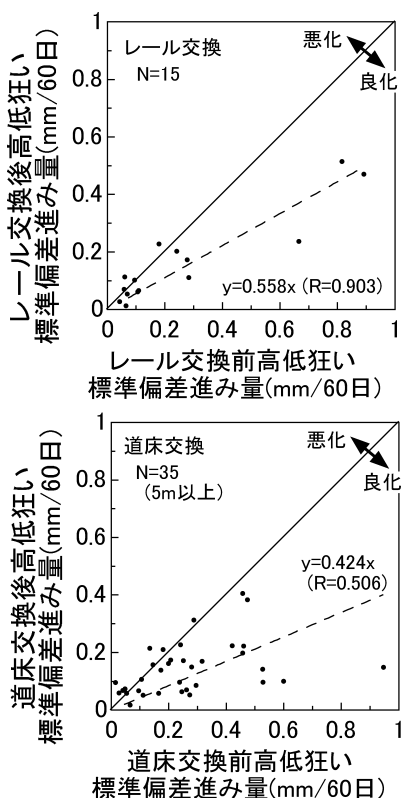


図15 材料保守による軌道狂い進みの減少効果

は一定であることを前提としていた。ところが、図 14 に示すように、レールや道床が劣化すると、軌道狂い進みの増加や軌道狂い保守効果の低下により、軌道狂い保守が多頻度化し、毎年多くの保守費用を要することになる。ここで、図 15 に示すように、レール、道床交換といった材料保守により軌道狂い進みは減少するため、材料保守には軌道狂い保守間隔の延伸効果を期待できることがわかる。ところが、一般に、材料保守は軌道狂い保守よりも多くの費用を要するため、材料状態や保守効果を良く検討したうえで、適切なタイミングで材料を交換などし、軌道狂い保守費用を含む総保守費用を長期的に減らすという考え方が重要である。このような総合的な保守計画を適切に決定するためのモデルを現在開発中である [5]。

今後、鉄道事業の収益の増加が見込めない状況下では、既存設備の有効活用を前提とするソフトの導入が

重要である。よって、OR の各種手法の発展に合わせて、それを容易かつ適切に利用できるモデル、システムを提案していくことが重要である。

参考文献

- [1] 三和雅史：軌道保守計画策定支援システムの開発，第 233 回鉄道総研月例発表会講演要旨，2010.
- [2] T. Oyama, M. Miwa: Mathematical Modeling Analyses for Obtaining an Optimal Railway Track Maintenance Schedule, Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, Vol. 23, No. 2, 207–224, 2006.
- [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, 51–65, 2001.
- [4] 大野良輔：JR 東日本の在来線における MTT 施工計画，新線路，4 月号，53–55, 2012.
- [5] 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，第 26 巻，第 2 号，13–18, 2011.