

NUOPT を活用した鉄道線路保守計画の最適化システム

財団法人鉄道総合技術研究所
軌道技術研究部 三和雅史

1. はじめに

我が国における鉄道線路（軌道）の多くは、レール及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、列車通過時に列車荷重が繰返し載荷されることによって軌道面の不整（軌道狂い）が徐々に成長して（図1～3）、車両の走行安全性が損なわれ、また車両の揺れが大きくなり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4）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。（なお、上下方向の狂いを「高低狂い」、左右方向の狂いを「通り狂い」という。）

以上のような軌道狂い保守は、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5）により行なわれる。この保守では、タンピングツールをまくらぎを挟む形で道床内に差し込み、まくらぎ下に道床を押し込みつつ両レールをクランプで保持して左右に移動して、まくらぎの位置を修正することで、軌道狂いを小さくする（但し、図2, 3に示したように、軌道狂いを完全になくすことは難しい）。

同様に、列車の繰返し通過によりレール表面の凹凸も成長する（図6）。その波長は軌道狂いに比べて短い、レール凹凸が大きくなると乗り心地や騒音が悪化することから、鉄道事業者は図7に示すような削正車によるレール表面の削正や交換を計画、実施している。また、これらの他にも道床等の材料の交換も軌道保守に含まれる。



図1 軌道狂い

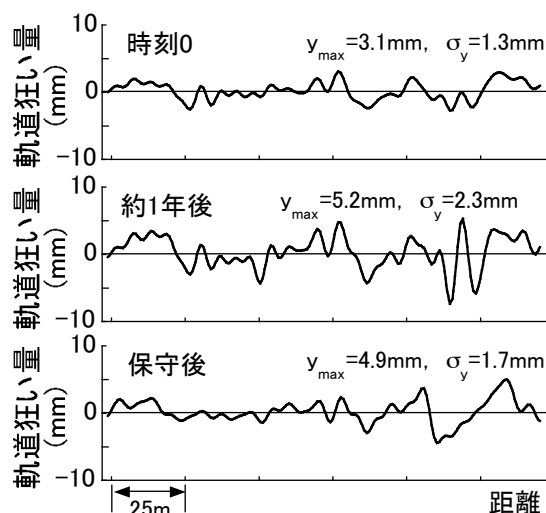


図2 軌道狂い波形の変化

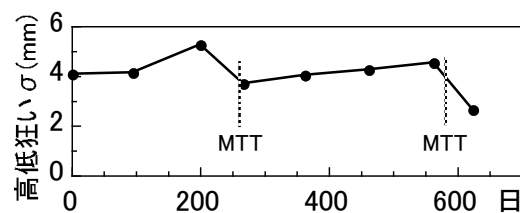


図3 高低狂い標準偏差の推移例



図4 軌道検測車（JR 在来線）



図5 MTT



図6 レール凹凸



図7 レール削正車

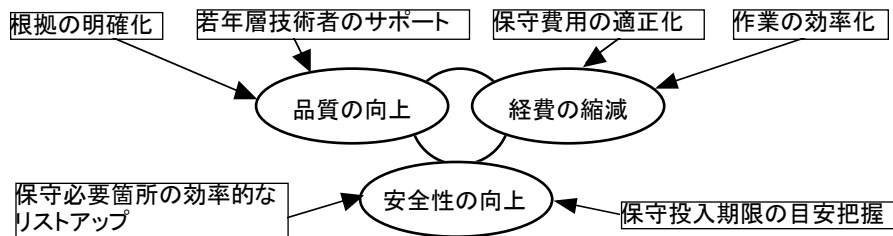


図8 軌道保守計画支援システムに期待されること

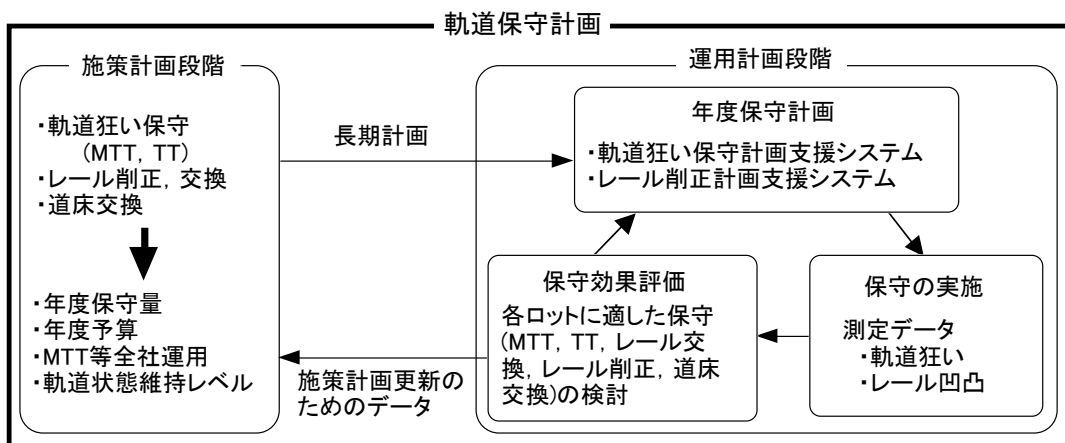


図9 軌道保守計画支援システム

さて、我が国の鉄道は重要な公共交通機関ではあるが、人口減少社会を迎え、今後は利用者数の増加を期待できず、また労働力が不足することが予想されている。よって、鉄道事業者にとって経営効率化と安全性向上の両立は最大の課題の1つであり、特に多くの経費を占めている軌道保守の効率化は重要である。本稿では、この問題を解決するために JR 等と共に開発してきた「軌道保守計画支援システム」を紹介する。

2. 軌道保守計画支援システム

軌道保守には、図8のように安全性及び輸送品質の確保と経費の縮減を両立させることが期待される。この保守計画には、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9)。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見直すことで、継続的に図8の関係を維持、発展させていくことが重要である。

以上より、運用計画段階で用いる軌道狂い保守及びレール削正計画支援システムを開発し、実用に供してきた。また施策計画段階で用いるシステムとして、各年度における各種保守の施工数量や予算を長期的な観点で適正に算出するシステム（長期軌道保守計画支援システム）を開発中である。各システムの概要を以下に示す。

2.1 軌道狂い保守計画支援システム

先述のように軌道狂い保守にはMTTが用いられ、MTTは担当線区中の複数の保守基地を移動しながら保守を行なう。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、任意の箇所劣化状態を容易に把握できるようになった。また基準値を超える軌道狂いの測定期間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自らの経験と勘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とから、計画の最適化は大きな課題であった。

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システム（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から軌道状態が悪い区間を選定し、計画期間中の軌道状態を最良化する軌道狂い保守計画（年度計画）を作成するものである。以下では、このモデル及びシステムの概要を示す。

2.1.1 最適軌道狂い保守計画モデル

本モデルは、線区及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10）。この計画は、与えられた保守量の下で線区全体の軌道状態をできるだけ良好に維持するように出力される。

また、MTTでの保守はある程度長い区間を連続して行なうことから、計画対象線区を図11に示すロット、ブロックという単位に分けた上で、計画を検討する。ロットとは100m区間の軌道狂い管理単位であり、軌道狂いの状態評価には標準偏差を用いる。ブロックとは連続するN個のロットの集合であり、出力する計画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～計画期間終了時までの期間の積の最大化と同値になる。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ブロックを予め作成した後に本モデルを解く。このため、総保守量を選択ブロック数の上限値として予め与え、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ブロックを前もって選択しておく（ブロック選択モデル）。

(1) ブロック選択モデル

本モデルにおける決定変数の対象はロット集合 $L = \{1, 2, 3, \dots, L^{\max}\}$ であり、連続するN個のロットから成るブロッ

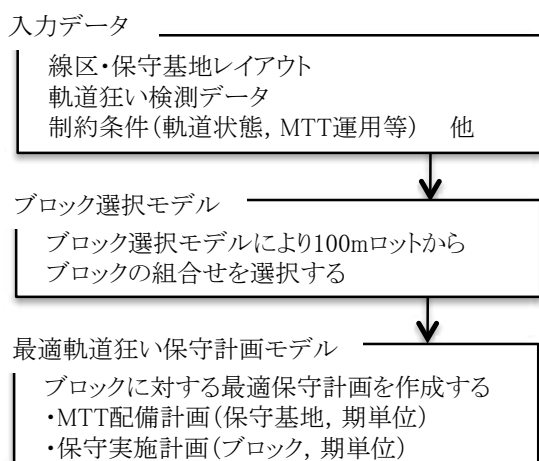


図10 モデルの構成

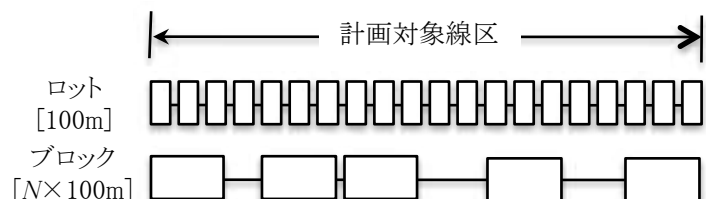


図11 ロットとブロック

ク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。制約条件は論理制約やブロックの選択方法等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。

a) 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

b) 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を選択する場合, ロット $i+1$ から $i+(N-1)$ を始点とするブロックを選択できない。

ii) ロット別保守実施制約

軌道狂い量が計画期間中に基準値を超過したり, 工事に合わせて保守するロットについてはブロックに含む。

iii) 選択ブロック数上限制約

総保守量の上限制約として, 選択するブロック数の上限値を与える。

c) 目的関数

ブロックに含まれるロットの保守改善量の総和を最大化するようにブロックを選択する。

(2) 最適軌道狂い保守計画モデル

本モデルは MTT の各保守基地への配備時期と対象ブロックの保守時期を決定する。集合として月集合 $M = \{1, 2, \dots, M^{\max}\}$, 期集合 $K = \{1, 2, \dots, K^{\max}\}$, 保守基地集合 $D = \{1, 2, \dots, D^{\max}\}$, ブロック集合 $U = \{1, 2, \dots, U^{\max}\}$ 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ブロックを決定する2種類が存在する。制約条件は論理制約に加えて MTT の稼働に関する制約等から構成される。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とする。

a) 決定変数

- i) z_{mkd} : 0 - 1 型整数変数, $m \in M, k \in K, d \in D$
= 1 月 m , 期 k に MTT を保守基地 d へ配備する
= 0 " しない

- ii) w_{mku} : 0 - 1 型整数変数, $m \in M, k \in K, u \in U$
= 1 月 m , 期 k にブロック u を保守する
= 0 " しない

b) 制約条件

i) 期別選定可能保守基地制約

MTT は1台とし, 各期にいずれかの保守基地へ配備可能とする。

ii) 期別 MTT 配備基地指定制約

特定期に MTT を配備する保守基地を指定する。

iii) 期別保守ブロック数上限制約

各期の保守ブロック数の上限値を与える。

iv) 期別ブロック別保守可能時期制約

ブロックの保守可能時期を設定する (例えば夏期作業制限区間)。

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。

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。

vii) 期間 MTT 移動可能範囲制約

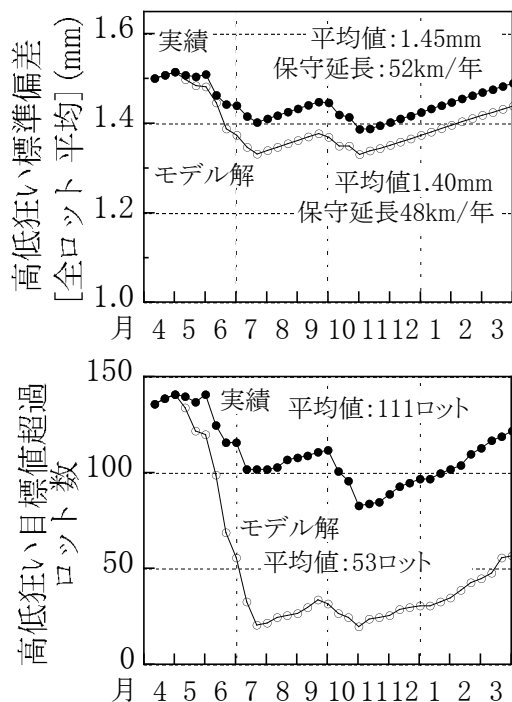


図 12 モデル解と実績の軌道状態の推移比較

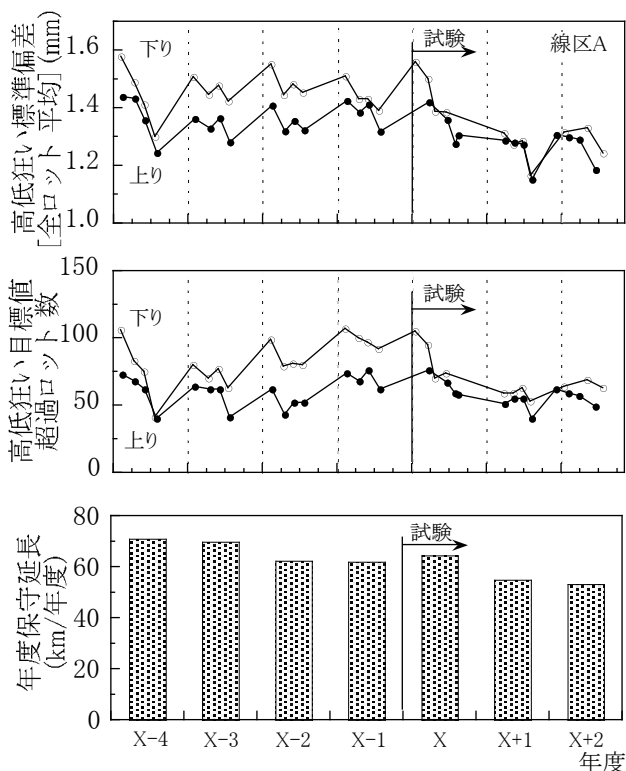


図 13 試験結果

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。

viii) 期別ブロック別保守実施制約

特定ブロックについて指定期間中に必ず保守を実施する（例えば、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ブロック）。

c) 目的関数

計画期間中の軌道狂い標準偏差の全ブロック平均値の最小化とする。

2.2 モデルの実施効果

上述の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、計画通りの保守を行な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。

(1) 使用データと前提条件

在来線における過去のある年度の保守計画を本モデルにより作成し、計画通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値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、当時の保守実績通りの保守を行な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。

(2) モデルの解法

上述のブロック選択モデルと最適軌道狂い保守計画モデルはいずれも全整数型計画モデルであり、特に最適軌道狂い保守計画モデルにおいては、適用対象となる線区によっては $0-1$ 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と考えられる。しかしながら、これまでの研究成果により、変数 w_{mku} の整数条件を緩和しても整数解の最適解、またはそれに近い整数解を短時間で得られることが分かっている。

(2) シミュレーション分析

モデル解及び当時の保守実績通りに保守した場合の軌道状態の推移を図 12 に示す。高低狂い標準偏差はモ

デル解の方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。

(3) 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なった。試験前後の軌道状態、保守量の推移を図13に示す。

開始後、保守量は年々減少したが軌道状態は良好化した。また、軌道状態は開始前には下り線の方が悪かったが、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なったことにより、上下線とも軌道状態が良好化したのに加え、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。

2.1.2 軌道狂い保守計画支援システム

軌道狂い保守計画支援システムは、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、Excelのアドインファイルとして登録することで、計画作成のための全操作をExcel上で行なうことができる。モデルを



図14 システムの画面表示例

表1 主な入力データ

	項目	入力
計画条件	計画期間	主操作シート
	1回の保守作業延長	
	計画の評価基準	
	軌道狂い(高低, 通り)に対する重み	
	列車動揺測定結果の考慮	
制約条件	各保守基地からMTTが出入りできる範囲	ファイル(csv)
	MTTの基地間移動可能範囲	
	各期の保守可能日数	
	軌道狂い, 列車動揺の管理値	
	MTT配備基地&期の指定/禁止	
軌道狂い履歴	軌道検測値	
	保守実績	

解くための最適化計算には、(株)数理システム社の NUOPT を使用している。これにより、NUOPT のバージョンアップに応じて常に新しい最適化手法を用いることができ、計算の高速化が継続的に期待できる。また、将来モデルを変更することがあっても、インタフェース部分の変更だけでシステムを再構築できる利点もある。画面例を図 14 に示す。

(1) 入力データ

本システムの入力データを表1に示す。ファイル入力するデータは全て csv 形式のファイルである。また、軌道狂いの履歴及び保守実績のデータを読み込むことで、各ロットの軌道狂い進み量や保守改善量を推計する。

(2) 操作方法

計画作成のための操作は Excel ファイルの主操作シート上で行なう。本シート上で計画条件を設定し、ボタン操作により制約条件や軌道狂いデータ等のファイルを読み込む。

(3) 出力

i) MTT の基地配備計画及び保守実施計画

各期における MTT の配備基地と保守するブロックを表形式で出力する。各ブロックについては、軌道狂い基準値の超過見込みの有無の他、踏切、構造物、分岐器の介在に関する情報も示される。

ii) ブロッカー一覧

各ブロックに含まれる個々のロットの軌道狂い、踏切等の介在情報が示される。

iii) 軌道状態推移予測

計画通りに保守した場合の軌道狂い推移予測を出力する。各線区の軌道狂い標準偏差の推移の他、基準値を超える軌道狂いが存在するロットの数の推移も示されるため、これらを用いて計画の妥当性(特に設定した保守日数の妥当性)を評価できる。

(4) その他の機能

ユーザが誤って矛盾する制約条件を設定した場合には、NUOPT が装備する WCSP(制約充足問題の求解機能)により、一部の制約条件を満たさない暫定計画を出力し、また満足できなかった制約についても出力する。これにより、ユーザは設定した制約の妥当性を確認できる他、暫定解をマニュアルで修正して実際の計画に代えることもできる。

また、最適軌道狂い保守計画モデルの目的関数を「軌道状態最良化」と「保守量最小化」の各基準から選ぶことができる。後者の基準の場合には、維持したい軌道状態(年度平均値等)の入力が追加となる。

(5) 鉄道事業者での活用状況

現在、本システムはJR 4社で使用されており、本社または支社において本システムで作成した計画案を現業区に配布し、現業区の担当者は本案を参考に最終的な計画を作成するという流れは各社で共通である。また、システムの入力データファイルを簡単に作成するためのモジュールを開発し、自社の保線管理システムと連携させることで、より簡単に計画を作成できるようにしている事業者もある。

2.1.3 レール削正計画支援システム

先述のように、レール表面の凹凸も列車の繰り返し通過により成長する。レール凹凸量は、直接その量を測定する他、車両の軸箱（回転する車軸を保持するために台車に設備された箱）の加速度によっても間接的に測定できる。よって、この値をレール凹凸量を表す指標とし、またMTTに代えてレール削正車の運用上の制約等を考慮して削正計画を作成すると考えることで、軌道狂い保守計画モデル及びシステムを削正計画の作成に利用できる。

以上より、軌道狂い保守計画支援システムをベースにレール削正計画支援システムを開発した。計画モデルの構造は軌道狂い保守計画モデルとほぼ同じであるが、レールは凹凸量の大きさに関係なく、敷設後の車両の通過量（通過トン数）に応じて交換されること等の制約を追加した。

なお、本システムについては、今後JR等での現地試験を行ない、実用化を目指す所存である。

2.2 長期軌道保守計画支援システム

軌道狂い保守計画支援システムは運用計画段階で用いるのに対し、ここに示す長期軌道保守計画支援システムは、今後何10年という長い期間における最適軌道保守計画を検討する施策計画段階で用いるものである。

システムの基本構成を図15に示す。本システムでは、軌道狂い、軸箱加速度（レール凹凸、道床状態を表す）等の測定データにより、各ロットにおける軌道狂い進みやレール凹凸進み等の劣化傾向、また各保守による改善効果をデータから推定した結果と保守費用との関係から、軌道狂い保守、レール保守、道床交換の各保守の時期（年

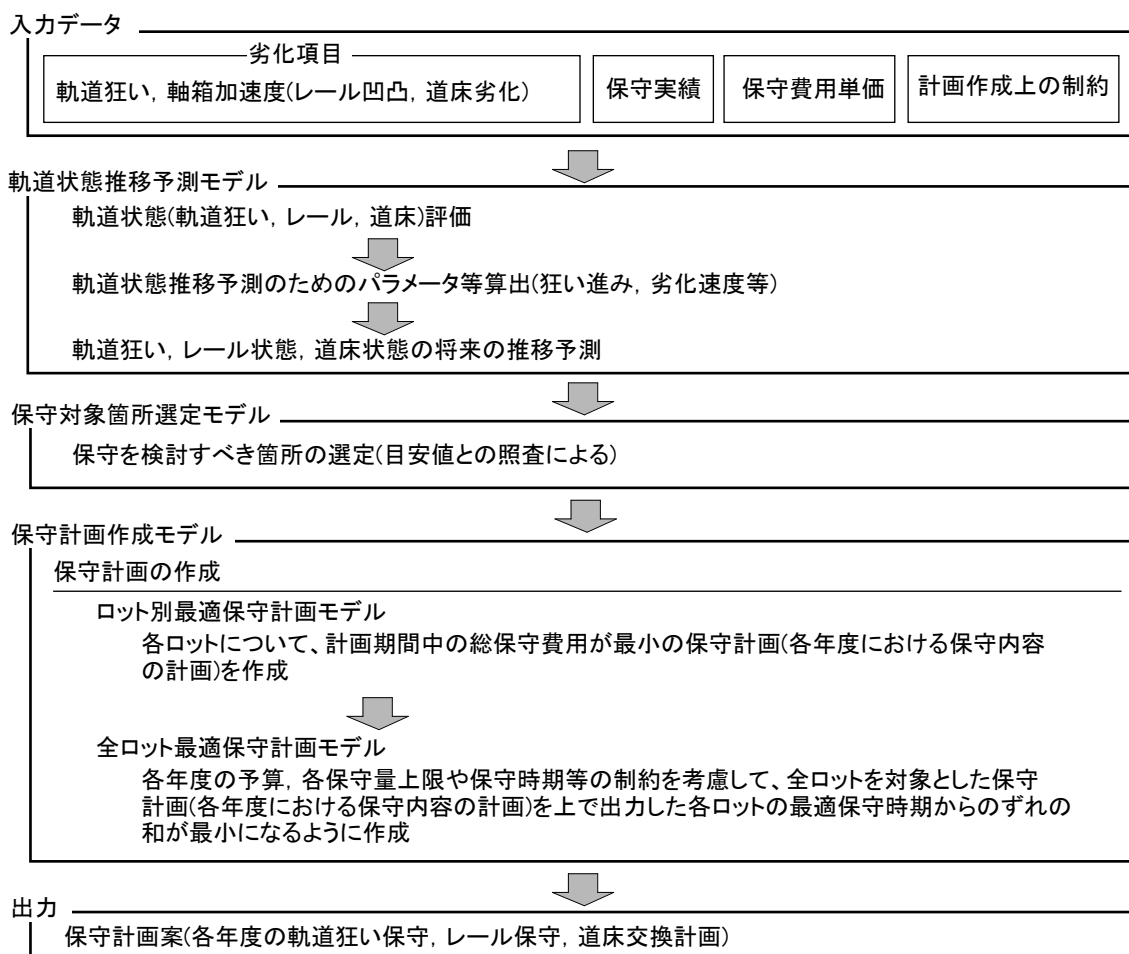


図 15 システムの基本構成

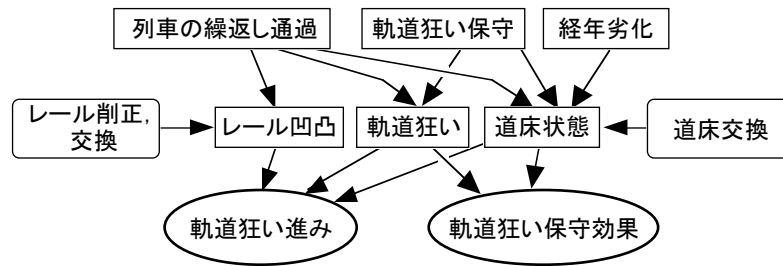


図 16 軌道狂い進み及び保守効果に影響する要因

表2 各保守の費用及び効果

			効果			
			軌道狂い		レール	道床
保守種類	方法	費用	改善量	進みの抑制	凹凸量改善	状態改善量
軌道狂い保守	MTT	大	大	小	—	悪化
	TT	小	小	小	—	悪化
レール保守	削正	中	—	中	中	—
	交換	大	—	大	大	—
道床保守	交換	大	大	大	—	大

度)及び内容を計画として出力する。計画モデルとしては、各ロットについて計画期間中の総保守費用が最小となる保守計画を作成する「ロット別最適保守計画モデル」と、本モデルの出力と各年度の予算及び各保守量上限や保守時期等の制約を考慮し、全ロットを対象とした保守計画を作成する「全ロット最適保守計画作成モデル」で構成される。特に後者のモデルでは、各年度の保守量の上限を制約として与えるため、特定の年度に施工数量が偏った計画が出力されることがない。

軌道狂い保守としては MTT, TT 保守(手作業による保守)、レール保守としてはレール削正、交換、道床保守としては道床交換を想定する。これら各保守は単純に各劣化項目が改善されるだけでなく、その変化がその後の軌道狂い推移等にも影響する(図 16)ことから、これを考慮しながら最適な保守計画を作成する必要がある。各保守の特徴をまとめると、以下及び表2のようになる。

(1)軌道狂い保守

MTT, TT により軌道狂いは改善し、MTTの方が改善量は大きい。但し、保守費用は MTTの方が大きい。各保守により軌道狂いが小さくなるため、軌道狂い進みは保守前に比べて幾らか小さくなる。なお、軌道狂い保守により道床が細粒化するため、道床状態は悪化する。

(2)レール保守

レール削正やレール交換によりレール凹凸量は減少し、レール交換の方が改善量は幾らか大きい。但し、保守費用はレール交換の方が大きい。

レール保守によりレール凹凸量が減少するため、軌道狂い進みは保守前に比べて小さくなる。この抑制の程度はレール交換の方が幾らか大きい。

なお、レール保守は軌道狂い保守ほど頻繁には行なわれない。

(3)道床保守

道床交換により道床状態が改善し、軌道狂い保守の改善効果は増加する。また、軌道狂い進みは保守前に比べて小さくなる。

なお、道床交換は軌道狂い保守ほど頻繁には行なわれない。

本システムでは、以上のような各保守の特性及び各ロットの劣化状態を考慮して、各年度において適切な保守を選択する。特に、レール保守及び道床交換が軌道変位進みを抑制する効果等を考慮することから、各保守を組み合わせた際の相乗効果を踏まえた総合的に最適な保守計画を出力する。

以上で得られた長期計画に基づいて先述の軌道狂い保守計画支援システムの計画条件（年度保守延長）を設定し、一方ではシステムに蓄積した軌道変位等の測定データを用いて長期計画を定期的に修正することにより、両段階の計画の品質は更に高まっていくことが期待できる。

なお、本システムの開発には今年度から着手しており、変数、制約条件等のモデルの具体的な構造について、実際の軌道狂い等データを用いて検討中である。今後、モデルを構築し、その有効性を確認でき次第、本システムについては紹介していきたいと考えている。

3 おわりに

軌道の管理においては、非常に多くの軌道状態に関するデータを測定しているが、これを有効に活用できていないのが現状である。以上に紹介した軌道保守計画支援システムは、軌道狂い等のデータを用いて適切な軌道保守計画を作成することで、軌道保守を効率化するために開発したものであるが、このような最適化技術の適用による効率化は、今後も軌道保守に関係する諸問題の解決には非常に有効と考えられる。特に、鉄道事業の収益の増加が見込めない状況下では、膨大な投資を要する新しい軌道構造や機械を導入するより、既存の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。このことから、軌道管理のレベルを更に高めることに対して最適化技術が果たす役割は、今後ますます大きくなるものと考えられる。最適化技術がこれからも継続的に向上し、またそれを容易に利用できる環境が整備されることは、鉄道が我が国の公共交通の一翼を担い続けていくためにも、大きく期待される場所である。