

Numerical Optimizer が変える線路のメンテナンス

公益財団法人鉄道総合技術研究所
軌道技術研究部 軌道管理研究室 室長 三和雅史

1. はじめに

鉄道線路（軌道）を構成するレール、まくらぎ、道床（砂利）等の材料や軌道面の不整（軌道狂い、軌道変位）の状態は、経年や列車の繰返し通過により劣化が進行する（図 1.1）。このため、安全で快適な列車の運行のために、これらの状態を把握するための検査が行われ、その結果に応じて必要な保守が実施される。一方、軌道は、その延長が何 km にも及ぶ細長く、長大な設備であるため、検査や保守に、多くの人手・費用を要してきたが、熟練担当者や多くの作業員を要する従来型の管理は、労働力不足や収入減少の時代を迎え、継続が難しくなりつつある。よって、人に依存した管理からの脱却が軌道においては大きな課題である。

以上の課題を解決するために、軌道の維持管理に関わる様々な業務を省力化する取組みが多く行われている。1つは検査や作業の機械化、もう1つはデータの管理・分析や計画策定を支援するためのシステム化である。機械化は、人が行ってきた作業を文字通り機械に代わらせるものである。一方、システム化は概念としては大変広いが、従来のような単なるデータベース化ではなく、検査等で得られた大量のデータを効率的、効果的に処理して、軌道保守の品質や効率を向上するものである。

このことから、効率的で高品質な保守の実現のために、OR を応用した軌道保守計画システムを開発し、実用化されており、そこでは最適化計算のためのエンジンとして、Numerical Optimizer が活躍している。以下に本システムの概要を紹介する。

2. 軌道の検査と保守

前述のように、軌道は劣化が進行するため、検査・診断・保守が行われる。東海道・山陽新幹線を走行するドクター・イエローは軌道等の検査のための専用車両であることは、今や多くの方々に知られている。例えば、軌道狂いについては、新幹線では10日、在来線では3ヶ月に1回程度の頻度で検査車両（検測車）を用いて測定（検測）され、そのデータは0.25～1mピッチで取得される等、データの量は大変多い。現在も多くの鉄道事業者で検測車が用いられているが、近年では営業車による高頻度検測が実用化され、検測頻度が格段に増えた結果、取得されるデータ量は更に膨大になりつつある。一方、材料検査は、機械化が進みつつあるが、人が検査する項目は依然として多く、また材料種別ごとの管理が基本である。

保守については、軌道狂いに対しては、図 2.1 に示すマルチプル・タイ・タンパー (MTT) という大型機械により、不整を小さくする保守を行っている。レール凹凸については、図 2.2 に示すレール削正車により、レール表面を削る作業（レール削正）が行われる。このレール削正は、凹凸除去の他、列車の繰返し通過によりレール表面に金属疲労層が形成されて傷が発生するため、この発生の防止のためにも用いられている。また、道床の細粒化や土砂混入等による道床劣化については、軌道狂いの増大や軌道狂い保守効果の低下をもたらすため、図 2.3 に示す道床交換機 (NBS) や図 2.4 に示す道床安定作業車 (DGS) を用いて道床交換が行われる。このうち、NBS は古い道床を撤去して新しい道床

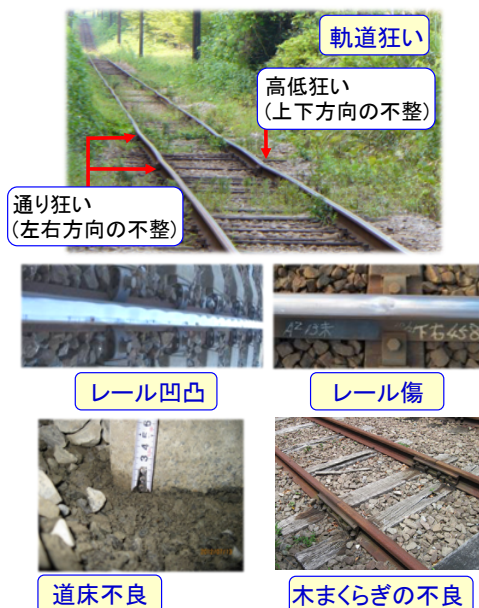


図 1.1 軌道の劣化の例



図 2.1 MTT



図 2.2 レール削正車



図 2.3 NBS



図 2.4 DGS

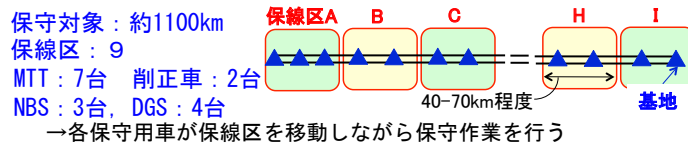
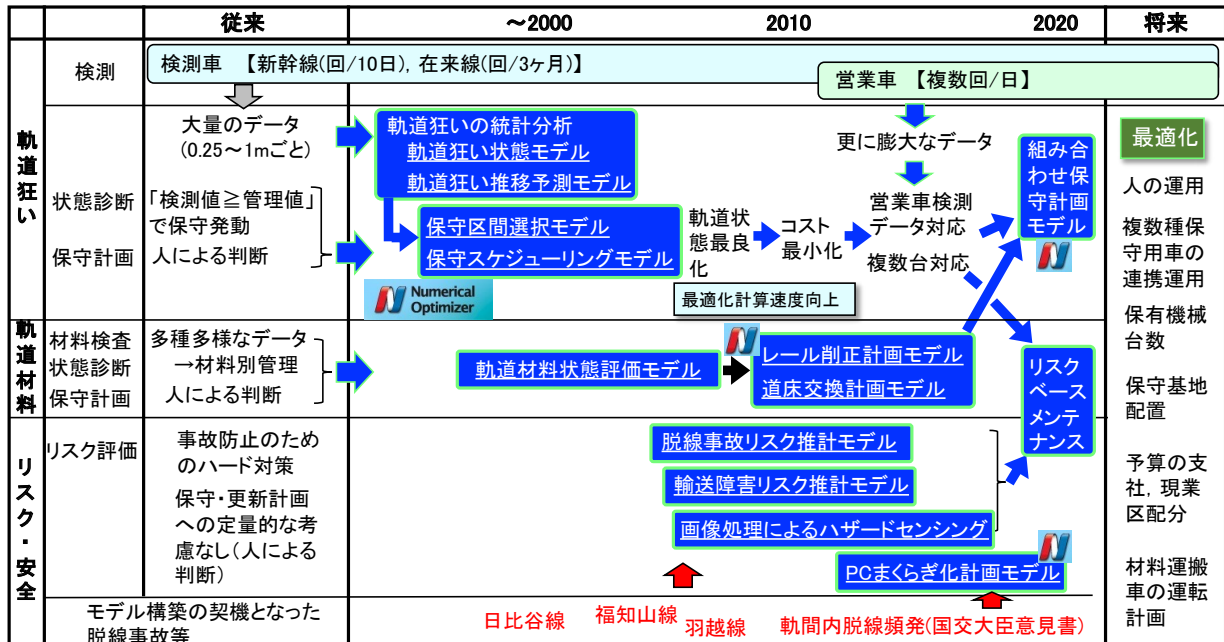


図 2.5 保守用車を複数保線区で共有している線区の例

表 3.1 軌道保守計画システムの開発過程と Numerical Optimizer



に交換する保守用車であり、DGSは道床交換後に軌道に振動を与えて道床を安定させるために用いられている。まくらぎについても、不良ものは交換されるが、特に木まくらぎの場合はコンクリート(PC)まくらぎに交換されることがある。これは、後述するように脱線事故の防止策の一環として実施される。PCまくらぎを連続的に交換する機械は一部の新幹線で用いられているが、殆どの場合、重機や手作業により1本ずつ交換されている。

以上に示した各保守用車は、線路上を自走し、人力での保守に比べて効率性や仕上がりの品質が優れているが、高価であるため、保線現業区(保線区)ごとに1台程度配備する、或いはある程度広いエリアに適切な台数を配備して複数の保線区で共有し、広範囲に運用するのが一般的である。図2.5は各保守用車の運用エリアの例であり、1000km以上の軌道で各々2～7台の保守用車が運用されている。

一般に、これらの保守用車による保守と線路上の移動は夜間に限られ、1日に保守できる延長には限界がある。また、保守作業の内容、箇所、時期の他、保守用車の検査の時期や場所等、保守計画を決めるには様々な制約がある。よって、軌道の保守では、保守箇所の選択と合わせて、保守用車運用を考慮しながら、各箇所への保守時期を決定するスケジューリングが重要である。

従来は、計画作成業務に熟練した担当者が経験的に培ってきた技能を發揮して保守スケジュールを作成していた。即ち、お客様を安全に目的地まで届ける列車運行を支えるための軌道保守は、夜間に数々の保守用車や作業員を軌道上に配置し、縦横無尽に年中動かし続ける「技」で成立していた。しかしながら、このような熟練者の技能に頼った方法では、多くの時間と手間を要するだけでなく、保守用車が故障した際には改めて関係各所と調整して計画を再作成するのにも多くの労力が必要である等の課題が存在していた。更に、こうした熟練担当者が減少し、保守作業の従事者の確保も難しい時代になり、量・質の両方が適切な保守計画を自動的に作成できるツールの開発が求められるようになった。

対象保守用車	保守箇所選択	計画モデル		
		主な制約	目的関数	出力
MTT	軌道狂い予測値大 道床交換 PCまくらぎ連続交換	台数 検査	軌道狂い整備基準値、保守期限 総移動距離(回送ロス)最小化 ↓ 軌道状態最良化	MTTの保線区、基地配備計画 軌道狂い保守計画
削正車	凹凸量予測値大 通トン 環境	各機械の稼働可能範囲	凹凸、通トン保守期限 保守費用最小化	削正車の保線区、基地配備計画 削正計画
NBS	道床不良	時期、区間、所要日数	総移動距離(回送ロス)最小化	NBS,DGSの保線区配備計画
DGS	道床不良	全作業割り付け		交換計画

図 3.1 各保守に対応する計画モデルの構造

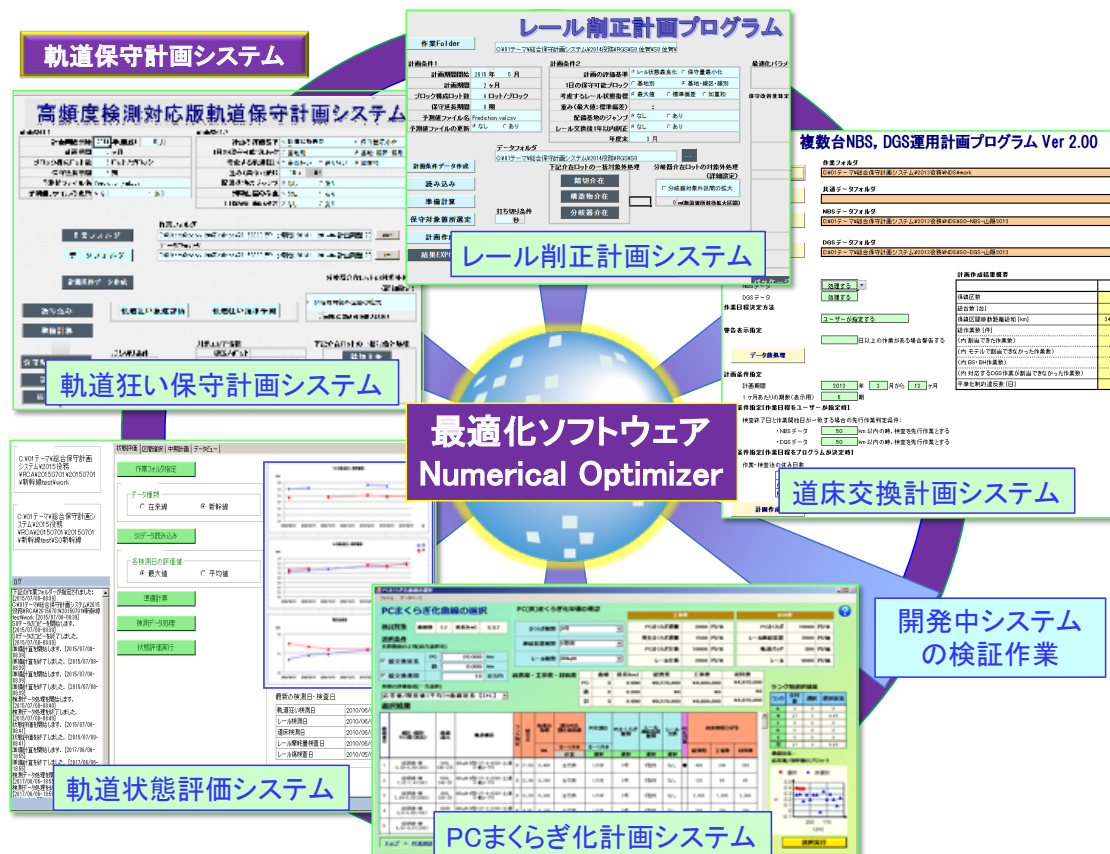


図 3.2 軌道保守計画システムと Numerical Optimizer

3. 軌道保守計画システムの開発

上記の実態に対し、軌道管理の品質や精度を高めるためには、検査データの処理の効率化と保守の内容、時期、箇所が適切な計画の作成が重要である。即ち、保守の実体を「将来の軌道状態を積極的に予測し、保守費や資源を有効活用する計画主導型」に変える必要がある。そのために OR を積極的に活用して開発したのが軌道保守計画システムである。開発の過程を表 3.1 に示す。

開発したシステムは、様々な種類の軌道保守に対応したサブシステムで構成される。そして各サブシステムでは、各保守に応じた種々の制約を考慮しながら、各保守の効率的な計画を作成するために構築された数理計画モデルが用いられる。種々の保守用車に対応する保守計画の策定のために構築したモデルの構造を図 3.1 に示す。各保守の実施箇所を選択する、或いは与えた上で、制約を考慮しながら、目的関数が最小または最良となるように、保守用車の運用を含む保守計画を作成する。例えば、MTT とレール削正車については、各保守用車の総移動距離を最小化するように各保線区への MTT、削正車の配備時期を算定した上で、維持する軌道状態を最良とする保守計画を作成する。一方、NBS と DGS については、道床交換作業を NBS、DGS の総移動距離が最小となるように各機械に割り当てて計画を作成する。

以上の各モデルを解くために用いられている最適化エンジンが、Numerical Optimizer である。各サブシステムと Numerical Optimizer との関係を図 3.2 に示す。各サブシステムにおいては、計画作成等のために最適化計算が行われる。その際に、Numerical Optimizer にモデルを記述したファイルやデータを送って実行することで、最適化計算の結果を得られ、これをサブシステムは所定の体裁に整えて出力する。この構成が、軌道保守のあり方を変えるための基本的なシステム構成である。今後、サブシステムの種類は増えていくと考えられるが、後述するように、更にサブシステム間での連携も進める予定である。よって、今後、Numerical Optimizer の活用場面は、益々増えると考えられる。

各サブシステムの概要を以下に示す。

3.1 軌道狂い保守計画システム

本研究を開始した 1990 年代の軌道狂い管理では、直近の検測値と管理値を照合し、検測値の方が大きい場合に保守する形態が一般的であり、履歴データによる予測は殆ど行われないう等、データの活用は十分でなく、また保守計画システムも未整備であった。そこで、軌道狂いデータを分析し、確率分布を想定した軌道狂い状態モデルや推移予測モデルを構築した¹⁾。これにより、各箇所の軌道狂いの将来推移の予測が可能になった。

次に、大きくなった軌道狂いに対しては、図 2.1 に示した MTT による保守が行われる。この MTT は、

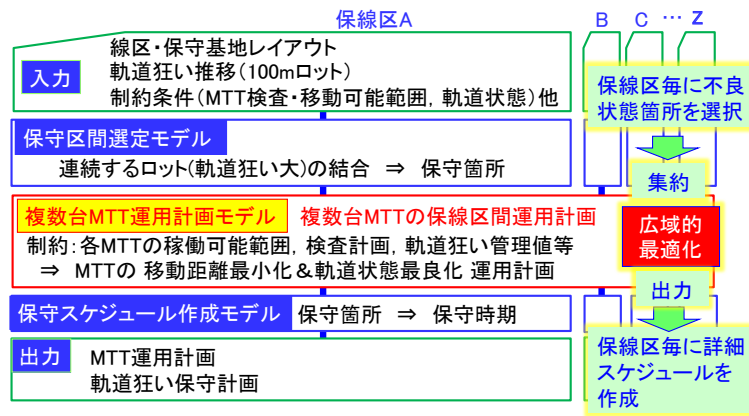


図 3.3 軌道狂い保守計画モデル

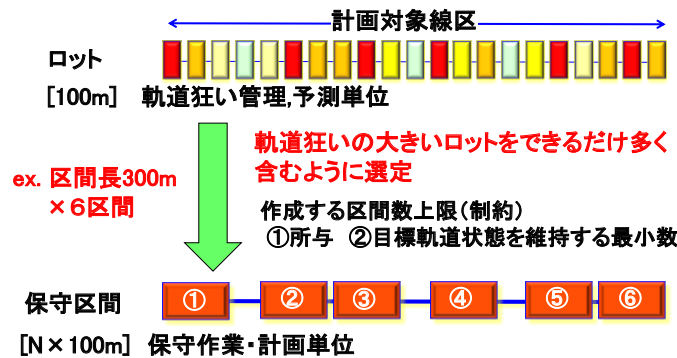


図 3.4 軌道狂い保守区間選定モデル

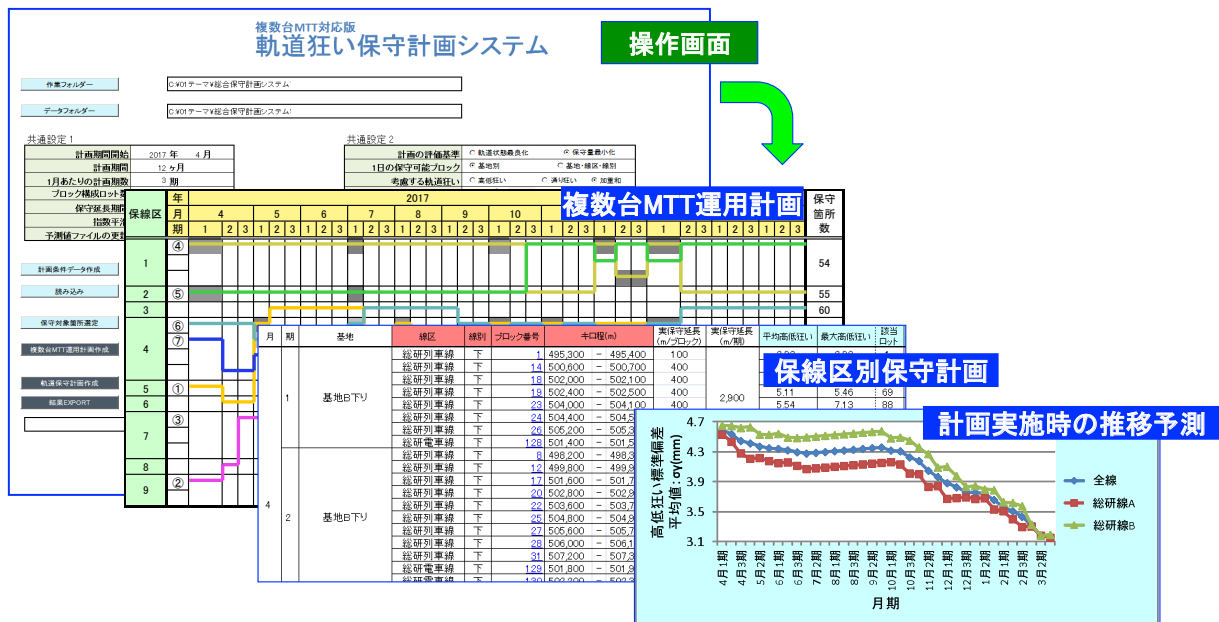


図 3.5 軌道狂い保守計画システム

主として夜間に線路上を移動して保守箇所の軌道狂いを整正するため、短期間で遠距離を回送できない等の制約がある。そこで、MTTの効率的な運用を考慮した保守計画の作成モデルを図3.3のように構築した^{2~4)}。本モデルは、年度保守計画を作成することを想定して構築された。

一般に、軌道狂いは図3.4に示すように100m等のロット単位で管理されるのに対し、MTTによる保守は数100m単位で連続的に行われるため、各箇所の軌道狂いに基づいて保守区間を切り出す必要がある。そこで、保守区間選定モデルと選択した区間に保守時期を付与するスケジュール作成モデルを構築した。保守区間選定モデルは、作成する区間数上限等の制約条件下で、軌道狂いの大きいロットをできるだけ多く含むように保守区間を選定するというものである。そのため、ナップサック問題を応用してモデル化した。保守スケジュール作成モデルについては、当初は、当時の鉄道会社の考え方に近い「総保守量上限下で線区全体の軌道状態をできるだけ良好に維持する」軌道状態最良化を目的関数として構築したが、経費削減のニーズを受けて「目標軌道状態をできるだけ少ない保守量で維持する」

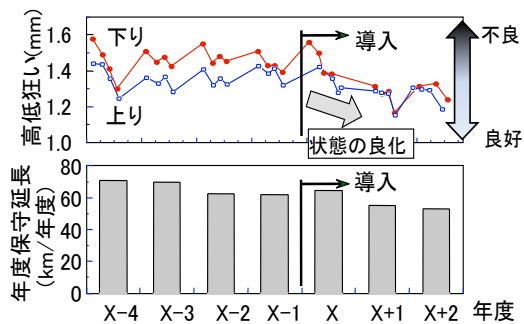


図 3.6 軌道狂い保守計画システムの導入効果

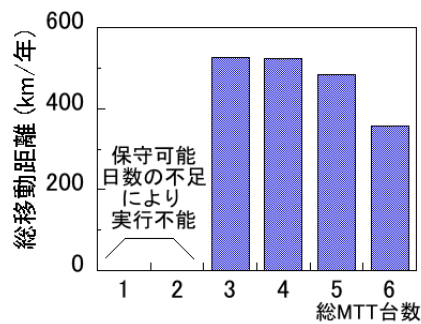


図 3.7 MTT 台数と総移動距離

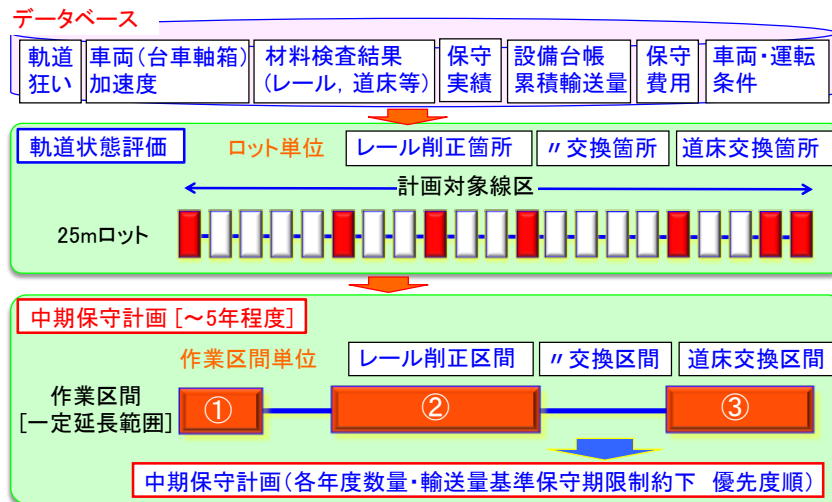


図 3.8 軌道状態評価システム

コスト最小化も適用可能とした。

一方、本モデルは数千～1万程度の整数変数を有する大規模モデルであり、計算時間短縮が実用化の最大の課題となった。そこで、一部変数の整数条件を緩和可能なモデル構造に改良した結果、多くの線区で最適解を短時間で得られるようになった。また、ユーザが多くの制約条件を設定してしまうと実行不能状態に陥ることがあるが、この場合、ユーザ自身に制約条件を削除する等して回避を求めるのは困難であるという問題があった。これに対しては、Numerical OptimizerにWCSPという機能が新たに実装されたことで、解決できた。WCSPでは、実行不能なモデルであっても、優先度の高い制約条件をできるだけ満たす解を探し、また満たせなかった制約条件が明示されるため、何らかの計画がユーザに提示される。ユーザはこうした情報に基づいて計画を手直しし、最終的な計画を作成できる⁵⁾。

以上の結果、図 3.5 に示すようにシステム化された後、JR5 社に導入され、現場の担当者はシステムの出力を参考に最終的な計画を作成している。

本システムの導入前後の軌道状態、保守量の推移を図 3.6 に示す。導入後、保守量は年々減少したが、軌道状態は良化し、システムの導入効果が現れている。特に、導入前は下り線の方が軌道狂いは大きかったが、導入によって下り線への保守が多く計画された結果、下り線の軌道状態が大きく改善し、上下線で同等の状態になった。このように、本システムでは、軌道狂いが大きな箇所への保守が確実に計画されるため、少ない保守量で良好な軌道状態を実現できる。なお、本システムには、年々機能が追加されており、現在では保守計画作成の基本機能の他、軌道狂い進みが急激に大きくなった箇所や道床状態不良箇所、MTTではなく人が手作業で軌道狂いを保守の方が効率的な箇所等をデータ分析結果に基づいて選定する機能がある。

更に、本システムは、当初は1台のMTTの担当エリア内の軌道狂い保守計画を作成するものとしてシステム化されたが、先に述べたように、複数台のMTTを複数の保線区で共用し、広範囲に運用する場合があるため、複数台MTTの広域運用に対応したシステムにも発展させた⁶⁾。本システムでは、保線区別に保守箇所を選定して集約し、各保線区に含まれる保守箇所数や保守期限を考慮した上で、各保線区へのMTT運用計画を出力する。そして、この出力を考慮し、再度保線区別に各保守箇所への保守時期を決定する。MTTは台数や稼働日が多いため、このように計画モデルを階層化することで、短時間で計画を得られるように工夫してある。

本システムで図 2.5 に示した線区における年度保守計画を作成したところ、得られた保守箇所と当時の保守箇所との一致率は71%と高く、保守箇所を適切に選択できた。そして、MTTの総移動距離4990.1kmの計画を得られ、この距離は当時の実績における距離より、30%短いものであった。また、

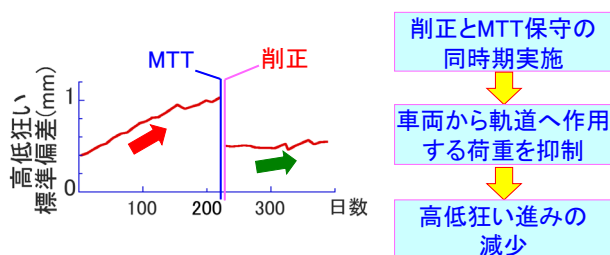


図 3.9 組み合わせ保守効果

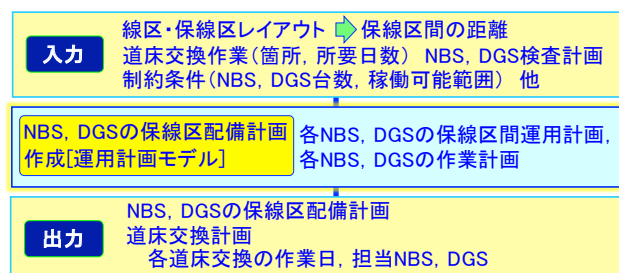


図 3.10 道床交換計画モデル

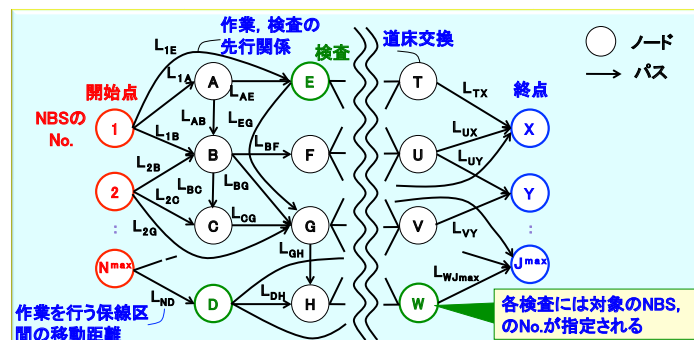


図 3.11 本モデルのネットワークによる表現 (NBS の例)

各保線区での軌道狂い保守計画を作成した結果、得られた計画に基づいて保守した際に予想される軌道状態は年度初より年度末の方が小さく、良化を期待できるものであり、当時の実績通りの保守により実現する軌道状態より良好であった。よって、本システムで得られる計画の質は十分に高いことが確認された。

ところで、本システムを用いて、MTT 台数をパラメータとして試算することで、適正な MTT 保有台数を検討できる。検討例を図 3.7 に示す。本条件では、選択した箇所を保守するためには 3 台以上の MTT が必要であり、6 台を 5 台に減らすと総移動距離は約 130km/年増えること等を確認できる。このように、保守用車の保有台数のような、施策に関する検討にも本システムを活用できる。

3.2 材料保守計画システム（レール削正、道床交換等）

(1) 軌道状態評価システム

軌道狂い保守計画システムの開発の後、課題となったのが、軌道材料保守計画の最適化である。一般に、列車の繰り返し通過により、軌道狂いだけでなく、レール表面の凹凸量が増加し、また道床の細粒化や土砂混入が進む。そこで、図 3.8 に示すような、検査データ等からレールや道床の状態不良箇所を選択し、保守内容やスケジュールを出力する軌道状態評価システムを開発した⁷⁾。

本システムは、各箇所（25m ロット）の軌道状態を診断し、レール削正・交換、道床交換の要否を判定する。その上で、今後 5 年程度の期間において、各年度に上記の保守の実施年度を出力する。この際、各保守は連続的に行われることを考慮して、保守区間として出力するが、ここでも軌道狂い保守計画システムにおける保守区間選定モデルと同じモデルが用いられ、これを解くために Numerical Optimizer が使われている。そして、保守の優先度の高い順に各年度の保守箇所として割り付けられる。なお、年度単位でのスケジュールの出力であるため、保守用車の運用は計画には含まれない。

(2) レール削正計画システム

レール凹凸は騒音や振動の原因となるため、図 2.2 に示したレール削正車により凹凸が削られる。そこで、軌道狂い保守計画モデルを改良し、削正車の運用を考慮した削正計画モデルを構築してシステム化した⁸⁾。本モデルにより、過去の年度の計画を作成した結果、削正箇所は当時の実績と 87% で一致し、また削正車の総移動距離は当時の実績より約 20% 短くなった。更に、得られた計画に基づく削正を行った際に予想されるレール状態は、年度初に対して年度末には良化すると予想され、この値は実績より良好だったことから、十分に効率的な計画を作成できることが確認された。本システムも一部の JR で使用中である。

ところで、軌道狂い保守とレール削正を同時期に行うと車両から軌道への作用力を減らせるため、図 3.9 のように保守後の軌道狂い進みが減少し、軌道狂い保守の周期を延伸できる⁹⁾。これまで、軌道狂い保守、レール削正の計画作成のためのサブシステムを別々に活用してきたが、今後、MTT とレール削正車の運用を連携させた「組み合わせ保守計画」の作成システムを開発することで、更に効果的な保守計画を作成できる。

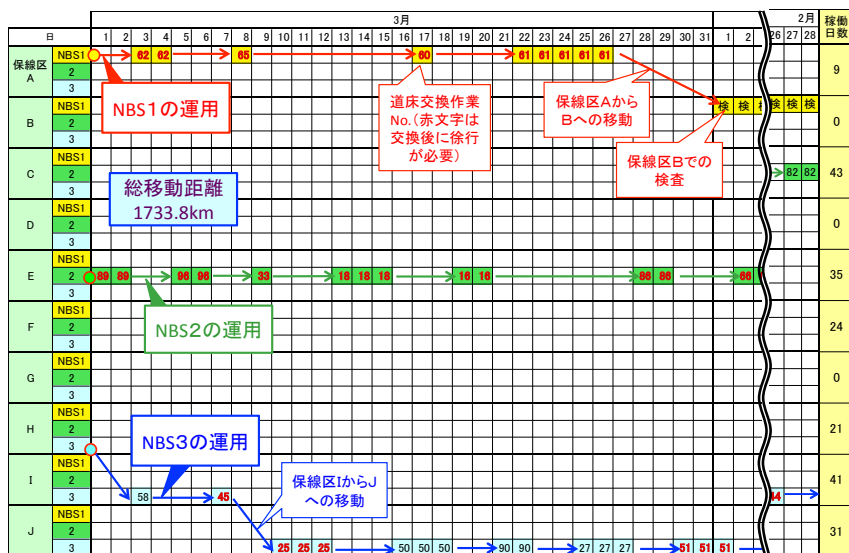


図 3.12 システムで作成した NBS 運用計画（一部）

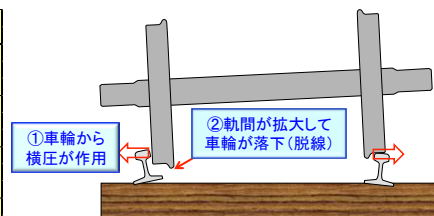


図 3.13 軌間内脱線

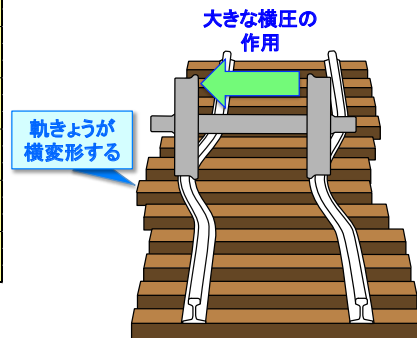


図 3.14 軌きょうの横変形



連続PCまくらぎ化



部分PCまくらぎ化

図 3.15 PC まくらぎ化

(3) 道床交換計画システム

道床交換には図 2.3, 2.4 に示した道床交換機 [NBS], 道床安定作業車 [DGS] が用いられ, これらも複数の保線区で共用され, 広範囲に運用して用いられる. そこで, その運用計画を作成するモデルを構築し, システム化した⁶⁾. この道床交換計画システムでは, NBS と DGS の運用計画を図 3.10 に示すモデルに基づいて作成する.

入力データとして, 各保線区間の距離の他, 各箇所其道床状態に基づいて交換箇所を選定し, 各交換作業の所要日数を与える. また, 各 NBS, DGS の検査計画の他, 箇所によっては交換後に列車の徐行が必要であるため, 1 日あたりの徐行箇所を上限数以下とする等の運用上の制約を与える. そして, 各 NBS, DGS に作業を割り当てて運用計画を作成する. ここでは, 各交換作業の箇所, 所要日数を考慮し, 各保守用車の各保線区への配備と担当作業の計画を日単位で作成する. この際, 保守用車の保線区間移動距離の総和が最小になるように計画を作成する.

本計画モデルは, 図 3.11 に示すように, 各作業や各 NBS, DGS の検査をノード (図中の○) とし, 各パス (図中の○と○を結んだ線) に保線区間移動距離というコストが付与されたネットワークとして表せる. 各作業等の時間的な先行関係は矢印で示され, このネットワークにおける各開始点から終点までの経路の中で, 最小の移動距離のパスが NBS, DGS の運用計画となる. このパスの探索には最適化計算が必要であり, Numerical Optimizer が用いられている.

本モデルにより NBS 等の運用と道床交換の計画を簡単に作成できるように, 道床交換計画システムを開発した. 結果については, NBS, DGS の運用計画がガントチャートで示され, また各 NBS, DGS が担当する道床交換作業のスケジュールが表形式で出力される.

本システムにより道床交換の年度計画を作成した. ここでは, 過去の年度において実施した 90 の交換作業と 7 回の検査を入力として与えた. その結果, NBS について, 図 3.12 のような総移動距離 1734km の計画を得られ, 当時の実績 (3467km) の約半分の移動距離で済む計画を得られた. このように, 本システムにより効率的な道床交換計画を作成できることが確認できたため, 2～3 年以内の実用導入が決定している.

3.3 リスクや安全性に関する軌道保守計画システム

(1) 軌道構造改良計画システム (PC まくらぎ化計画システム)

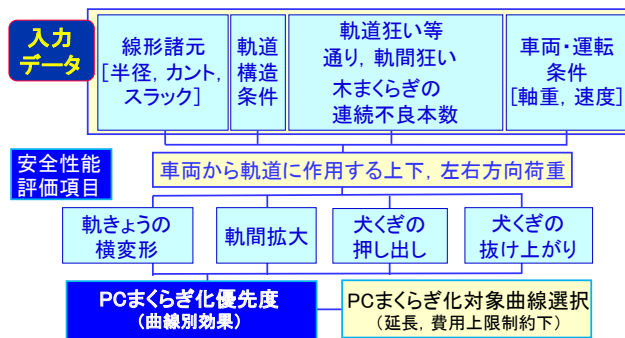


図 3.16 PC まくらぎ化優先度の算定法

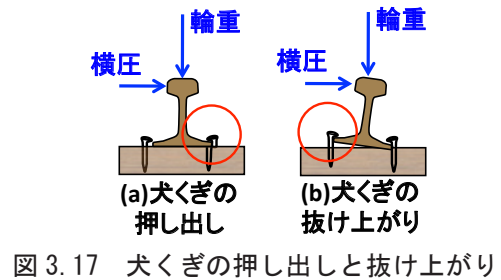


図 3.17 犬くぎの押し出しと抜け上がり

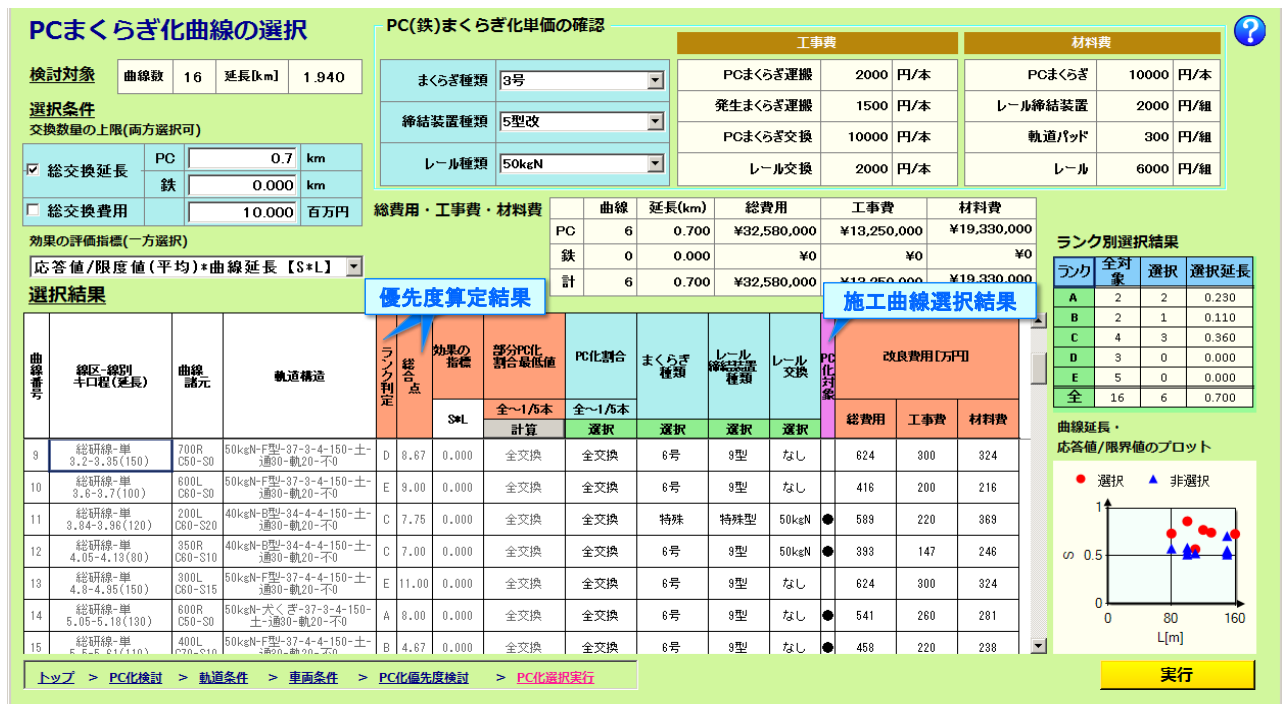


図 3.18 優先度算定結果と施工曲線選択結果の出力画面

木まくらぎは古くから軌道の材料として用いられ、現在でも多くの地域鉄道の本線の他、駅や車両所の構内等で広く用いられている。この木まくらぎは、長年の使用により図 1.1 に示したような劣化が進むと、レールがまくらぎに固定されない締結不良の状態となる。これが連続して存在すると、列車の通過時に作用する横圧（車輪からレールに作用する軌道面に平行方向の力）により軌間（左右のレール間の距離）が拡大し、図 3.13 のように車輪が落下する軌間内脱線に至ることがある。また、横圧が作用した際に軌きょう（レールとまくらぎをはしご状に構成したもの）に横移動の力が発生すると、図 3.14 のように軌きょうの横変形が発生することがある。こうした木まくらぎの腐朽によるレール締結力の低下に伴う軌間内脱線は毎年発生しており、2018 年には国の事故調査組織である運輸安全委員会から国土交通大臣宛に意見書が出された。

この軌間内脱線の発生を防止するため、腐朽の心配がない PC まくらぎに交換する「PC まくらぎ化」という施策が行われることがある。PC まくらぎ化の方法としては、図 3.15 に示すように連続的、或いは部分的に交換する方法がある。部分的な交換では、脱線に至らせない範囲で PC まくらぎの本数を減らせるため経済的ではあるが、いずれの方法でも多額の費用を要するため、安全性向上効果が高い箇所を優先的に施工する必要がある。近年では、地域鉄道の持続的な維持を目的として、国や自治体からの補助金により PC まくらぎ化が行われることがあり、PC まくらぎ化予算の有効活用が課題である。そこで、この優先度を曲線別に算定して対象曲線を選択するモデルを構築し、システム化した¹⁰⁾。

各曲線における PC まくらぎ化優先度は、図 3.16 に示す考え方で算定する。線形諸元、軌道構造・軌道狂い、車両・運転条件を入力し、輪重（車輪からレールに作用する軌道面に直角方向の力）と横圧を算定して、安全性を評価する。この評価項目は、国が定める軌道の設計法で考慮する 4 項目である。各項目における限界値（安全性を満足しなくなる値）と応答値（使用中に発生し得る最大値）を求め、「応答値 / 限界値」により安全性を評価して優先度を算定する。なお、犬くぎの押し出し、抜け上がりとは、図 3.17 に示すように、横圧によりレールに横変位、或いはねじりが生じて犬くぎが大きく変形する、または抜け上がる状態の発生のことである。

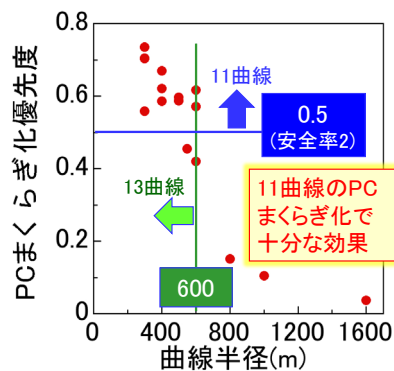


図 3.19 PC まくらぎ化優先度

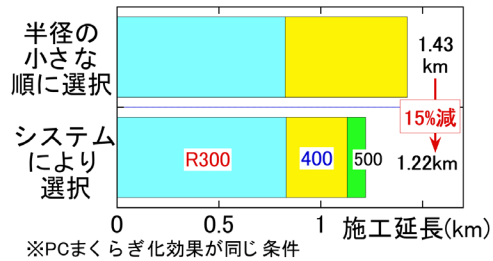


図 3.20 施工曲線選択結果

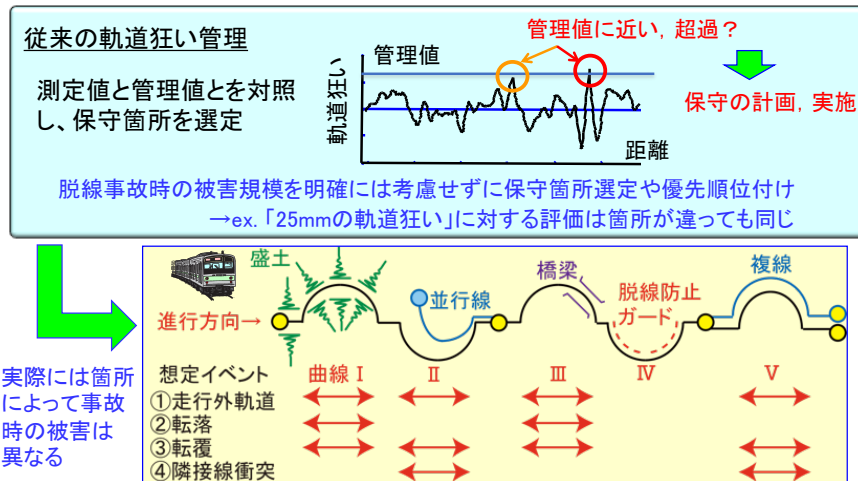


図 3.21 脱線事故リスクを考慮した軌道狂い保守の考え方

図 3.18 は優先度算定結果のシステムでの出力画面である。上記の 4 項目のうち応答値 / 限界値が 1 項目でも 1 を超えた曲線（図中の曲線番号 14）については、A ランクと判定し、最優先で PC まくらぎ化することを提案する。一方、どの項目も 1 を超過しない曲線については、応答値 / 限界値の 4 項目の平均値を PC まくらぎ化優先度とし、画面にはランク B～E の順に優先度が高いとして出力される。

算定された各曲線の優先度に基づき、PC まくらぎ化する曲線を選択する。ここでは、PC まくらぎ化する曲線の総延長や総費用の上限制約下で、施工対象として選択した各曲線における PC まくらぎ化優先度の総和が最大となるように曲線群を整数計画モデルにより選ぶ。即ち、この際に Numerical Optimizer が用いられている。図 3.18 において「PC 化対象」列に●が表示された曲線が選択された施工曲線であり、PC まくらぎ化の費用も曲線別に出力される。

本システムを地域鉄道線区のデータに基づいて作成した模擬線区データに適用した。ここでは、全線が 15km 程度の半径 300～1600m までの 16 曲線を有する線区データを用いた。各曲線の優先度を曲線半径別にまとめた結果を図 3.19 に示す。一般に、半径が小さい方が横圧が大きくなるため、優先度は高い傾向にあり、最も優先度が高い曲線は、検討対象とした曲線中で最小の半径 300m であった。一方、半径がほぼ同じであっても優先度が異なる曲線がある。これは、各曲線によって速度等の条件が異なるためである。この結果、例えば半径 600m 以下の全 13 曲線の PC まくらぎ化を行わなくても、11 曲線の PC まくらぎ化を行うだけで、線区としての安全性を安全率 2（優先度 0.5 の逆数）以上の状態にまで高められることが分かる。

以上の優先度を考慮して PC まくらぎ化曲線を選択した結果を図 3.20 に示す。ここでは、PC まくらぎ化対象曲線の優先度の和（≒安全性の向上効果）を一定値以上確保することを条件として選択した。その結果、システムを用いて選択した方が半径の小さな曲線順に選択した場合と比べて、15% 短い延長の施工で同程度の安全性の向上が実現できた。

本システムは地域鉄道を中心に活用され、各線区の持続可能性を高めることに貢献している。

(2) 脱線事故リスクを考慮した軌道保守計画システム

軌道管理の目的の 1 つは安全性の維持、即ち脱線事故防止であるが、稀に事故が起きて社会問題化する。表 3.1 に示した脱線事故には、脱線後の車両挙動により大事故に至った例が含まれる。今後の軌道狂い管理においては、図 3.21 に示すように、従来の「検測値と管理値の対照」だけでなく、脱線事故リスクが高い箇所を選定し、保守優先度を高める「リスクを考慮した保守」が、より安全性の高い

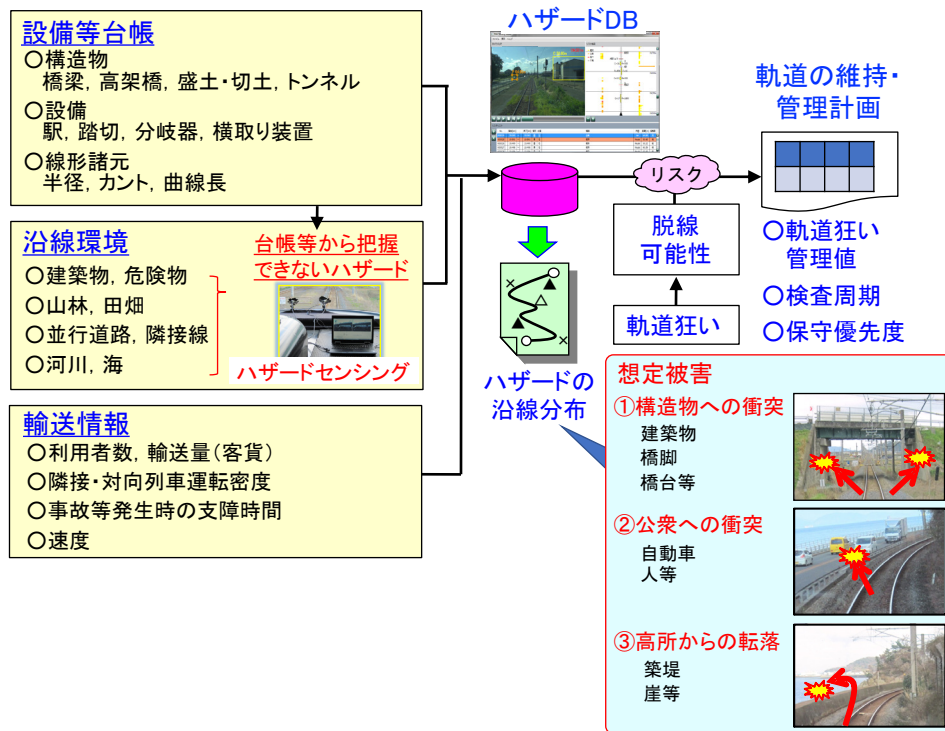


図 3.22 軌道のリスクベースメンテナンスモデル

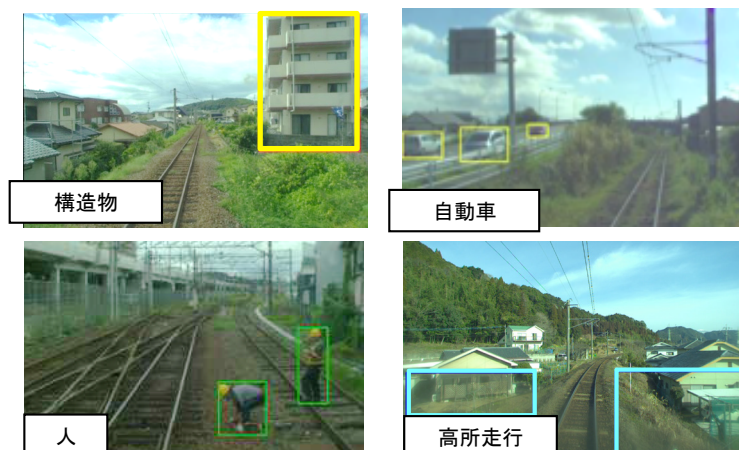


図 3.23 ハザードの抽出例

鉄道システムの実現のためには必要と考えられる。そこで、事故リスクの推計モデルを構築し、これを考慮した軌道狂い保守計画の作成法を開発した¹¹⁻¹²⁾。

さて、脱線事故時に車両が軌道を逸脱して走行した場合、車両の挙動次第で負傷者等の被害が拡大する箇所がある。よって、このような箇所では、軌道狂い管理値や検査周期の見直しや、保守優先度を高めることがリスク管理上は適当と考えられる。そこで、脱線事故リスクを考慮した軌道の維持・管理計画法をリスクベースメンテナンスモデルとして構築した。

本モデルの構造を図 3.22 に示す。本モデルでは、被害拡大要因（ハザード）の沿線分布を把握するために、列車の先頭で取得した画像から、脱線後の車両の挙動次第で被害が拡大する要因の存在を検出（ハザードセンシング）し、ハザードの沿線分布を作成する。検出するハザードは以下の通りである。

①建築物や橋脚等の構造物への衝突

脱線後の車両が周辺の建築物や橋脚等の構造物に衝突すると乗客等の被害が増える可能性が高いため、構造物を被害拡大要因として抽出する。

②公衆（自動車、人）への衝突

自動車の交通量の多い道路や通学路等が線路と並行している箇所では、脱線後の車両が自動車や人と衝突して大規模な公衆被害が発生する可能性があるため、こうした箇所を抽出する。

③高所からの転落

脱線後の車両が高所から転落すると乗客等の被害が増える可能性が高いため、高所箇所を抽出する。

営業線で取得した画像からハザードを抽出した例を図 3.23 に示す。これらについては距離情報と合

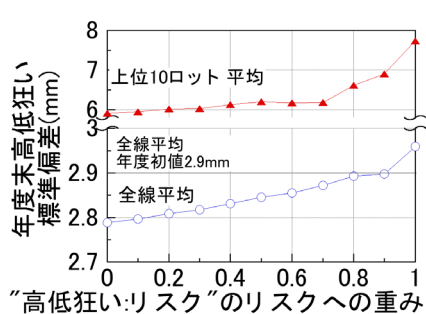


図 3.24 リスクへの重みと高低狂い

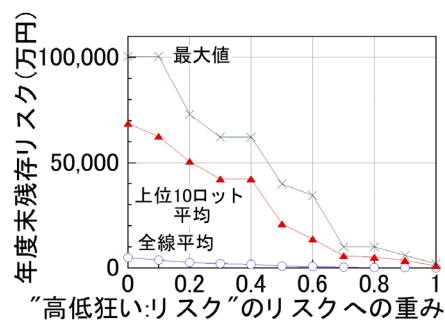


図 3.25 リスクへの重みと残存リスク

わせて、データベースに保存される。一方で、列車の乗客数等の輸送情報を用いて事故時の想定被害を箇所別に推計する。そして、各箇所の軌道狂いを用いて脱線可能性を評価し、ハザードを乗じて、リスクを推計する。

本モデルを用いて、リスクを考慮した軌道狂いの管理値や検査周期の適正值を設定し、また箇所別の保守優先度を算定して軌道狂い保守計画に反映することで、線区の安全性・信頼性を向上できる。このうち、軌道狂い保守計画については、3.1 に示した軌道狂い保守計画システムにおいて軌道狂いの他にリスクも考慮することで、計画を作成できる。ここで、目的関数としては、計画期間中の平均軌道狂いとリスクの各々を目標値で除して無次元化し、それらの重み付き線形和を最小化する。

模擬線区データを本システムに適用し、軌道狂いの年間保守計画を作成した。目的関数で用いる「高低狂い：リスク」の重みについてはパラメータと考え、0（高低狂いのみ考慮）～1（リスクのみ考慮）の場合を設定して、計画を作成した。

計画通りの保守を行った際に実現する年度末高低狂いと残存リスク（保守されなかった箇所のリスク）を重みとの関係として図 3.24、3.25 に示す。リスクへの重みが増すと、残存リスクは減るが、年度末高低狂いは増える。特に、リスクに偏重しすぎると年度末高低狂い（平均）は年度初の 2.9mm より悪化する。本例では、重み 0.7 のとき、高低狂いを年度初と同等に維持でき、残存リスクを平均で約 300 万円に減らせるため、この程度の重みが適当と考えられる。

このように、軌道保守計画システムについては、日常業務だけでなく、軌道の維持・管理の将来のあり方を検討できる等、その活用可能性は限りなく存在すると考えている。

4. おわりに

最近の鉄道では、無人運転やバッテリー搭載等、新技術の研究や導入が進んでいるが、レール上を車両が走行するという形態は、まだまだ変わらないと考えられる。よって、軌道の維持管理の効率化は、今後も重要な課題であり続け、Numerical Optimizer はその解決のための頼もしいパートナーである。軌道においては、未解決の課題として、人、機械、予算、設備の配置・配分・規模の最適化等が山積しているが、その解決のために、OR や最適化ソフトウェアという強力なツールを今後も大いに活用する予定である。

本研究の一部は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

〔参考文献〕

- (1) 三和, 石川, 大山 [1998] 「軌道状態推移予測モデルの構築に関する基礎的検討」 J-RAIL'98.
- (2) 三和, 石川, 大山 [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.
- (3) Miwa, Oyama [2004] "All - integer Type Linear Programming Model Analyses for the Optimal Railway Track Maintenance Scheduling", OPESEARCH, Vol.41.
- (4) Oyama, Miwa [2006] "Mathematical Modeling Analyses for Obtaining an Optimal Railway Track Maintenance Schedule", Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, Vol.23.
- (5) 三和, 大山 [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, Vol.69.
- (6) 三和, 矢坂, 吉田, 松本, 佐々木, 松丸 [2014] 「複数台の保守用車運用を考慮した軌道保守計画モデルの構築」 鉄道総研報告, Vol.28, No.6.
- (7) 三和, 木村, 山中 [2012] 「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, Vol.26, No.2.
- (8) 田中, 福山, 三和 [2009] 「レール凹凸評価指標と削正車最適運用計画策定システム」 鉄道総研報告, Vol.23, No.10.
- (9) 松本, 三和, 吉田, 矢坂, 桶谷, 原田 [2016] 「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.

- (10) Katayama, Miwa [2015] “Developing Track Maintenance Planning System for Replacing Ties & Rails” , Railway Engineering 2015, Edinburgh.
- (11) Oyama, Miwa [2013] “Developing Optimal Track Maintenance Scheduling Model Taking Train Derailment Accident Risk into Consideration” , Railway Engineering 2013, London.
- (12) Miwa, Oyama [2018] “An Optimal Track Maintenance Scheduling Model Analysis Taking the Risk of Accidents into Consideration” , ITOR, Vol. 25.