

線路の維持管理効率化のための数理科学的技術の 開発実績と課題解決への方向性

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）の劣化状態は，経年や列車の繰返し通過により進行する。このため，安全で快適な列車運行を目的として劣化状態を把握する検査が行われ，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 にも及ぶ長大設備であるため，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，人口減少に伴う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。また，新型コロナウイルスの感染拡大防止策として，リモートワークや web 会議の導入・普及が進んだ結果，鉄道利用者は減少して鉄道事業の収益性が低下し，鉄道ネットワークの維持が困難になりつつある。このため，維持管理の省力化とコスト削減が大きな課題となっている。

以上の課題については，新型コロナウイルスの感染拡大による影響を除けば，以前より問題とされていたことであり，その解決を目的として，軌道の維持管理を省力化する様々な取り組みが行われてきた。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。このうち機械化は，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，軌道の維持管理の品質や効率を向上するものである。

これらのうち，後者のシステム化に関しては，オペレーションズ・リサーチ等の数理科学を応用した維持管理のためのモデルや手法が開発され，一部は実用化されている。本稿では，こうした維持管理モデルの開発実績をまとめると共に，ますます厳しくなる事業環境に対して有効と考えられる新しいモデルやその構造等を提案し，今後の研究の方向性を示す。

2 軌道の検査と保守の実情と課題

軌道は劣化が進行するため，検査・診断・保守（これらをまとめて「維持管理」という）

表 1 軌道の管理対象と検査・保守方法の例

	検査方法	保守方法
軌道狂い	検測車, 手測り	MTT 等による整正
レール	探傷車, 検査装置, 手測り	削正車による削正, 交換
まくらぎ	目視	交換
道床	目視	交換

が行われる。軌道の一般的な管理対象と検査等の現状を表 1 に示す。

例えば、軌道狂い検査については、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 0.25~1 m ピッチで取得される等、データの量は大変多い。近年では営業車による高頻度検測が実用化され（葛西ほか、(2016)）、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、その効率的な処理と有効活用が課題となっている。一方、材料検査は、画像処理技術や非破壊検査技術の導入により自動化・機械化が進んでいるが、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り、状態診断が担当者の技能に依存している部分も多い。

保守については、軌道狂いに対しては、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が行われている。

レール凹凸についても、レール削正車という大型機械により、レール表面を削る保守（レール削正）が行われている。このレール削正は、凹凸除去の他、列車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、その防止のためにも用いられている。また、レール上を通過した車両重量の累積（通過トン数）が一定程度になった際に、レールは交換されるが、定期的に削正されるレールについては、この交換時期を遅らせることができる。

道床の細粒化や土砂混入等による道床劣化は、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、道床交換機（NBS）や道床安定作業車（DGS）を用いて古い道床を交換する。このうち、NBS は古い道床を撤去して新しい道床に交換し、また 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機能を有する。

まくらぎについては、状態が不良なものは交換されるが、特に木まくらぎは腐朽を原因とする脱線事故を防ぐため、コンクリート（PC）まくらぎに交換されることがある。まくらぎを連続的に交換する機械は存在するが、重機や手作業により 1 本ずつ交換されることが多い。

以上に示した各大型機械は、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おり、維持管理の効率化に大きく貢献している。但し、大変高価であるため、レンタルで利用する、或いは同種作業を人力で行う事業者も存在する。また、保有する事業者においても、その台数には限りがあるため、複数の現業区（保線区）で共有し、広範囲に運用するのが一般的で

ある。そして、大型機械による保守と線路上の移動は夜間に限られるため、1日に保守できる延長には限界があり、また機械の検査の時期や場所等、運用上、様々な制約がある。よって、軌道の保守では、保守箇所を選択と合わせて、保守用車の運用を考慮しながら、各箇所への保守時期を最適に決定することが重要である。

従来は、計画作成業務に熟練した担当者が技能を発揮して保守計画を作成していたが、作成には多くの時間と手間を要し、また機械故障の際には計画を短時間で再作成するのが難しい等の課題が存在していた。更に、熟練担当者数は減少し、保守従事者の確保が難しい時代になったことから、高品質な保守計画を簡単に自動作成できるツールの開発が求められている。

3 軌道の維持管理の効率化のための数理科学モデルの開発実績

軌道の維持管理を効率化するために、軌道検測データや保守実績データ、設備台帳等を管理するシステムとして、例えば東海道新幹線では、1970年頃からSMIS、そしてRINDAといったシステムの開発が進められた(田中、磯浦(1998))。一方、収集したデータから保守計画を出力するようなシステムは、1990年頃においては存在しなかったため、軌道狂いと材料の状態評価と保守計画の高精度化、高品質化を目標としたシステムの開発が進められた。

軌道の維持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内容、時期、箇所が適切な保守計画の作成が重要である。そのため、オペレーションズ・リサーチ等の数理科学を積極的に活用し、状態診断や保守計画に関するモデルを表2のように構築した。

表2 軌道の維持管理モデルの構築の過程

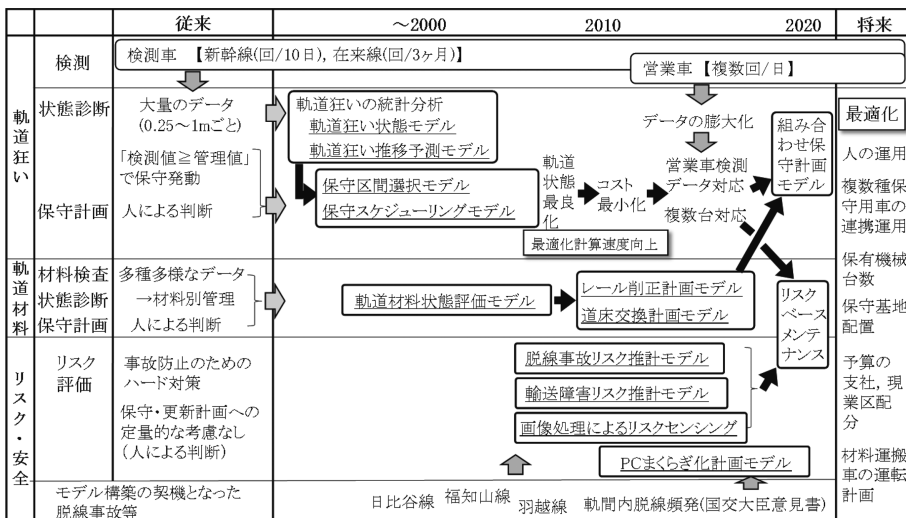


表 3 大型保守機械の運用を含む保守計画モデル

対象保守 用車	保守箇所 選択	計画作成		年度計画試算			
		主な制約	目的関数	移動距離	計算時間		
MTT	軌道狂い 予測値大	台数 検査	軌道狂い 管理値, 保守基地 配備, 保 守期限	総移動距離 (回送ロス) 最小化 ↓ 軌道状態 最良化 or コスト 最小化	7 台	対実績 比 -30% 保守箇 所一致 71%	7秒 保線区配 備計画作 成時
	道床交換 PCまくらぎ 連続交換						
削正車	凹凸量 予測値大	各機 械稼 働可 能範 囲	凹凸, 通トン 保守期限, 保守基地配 備	軌道状態 最良化 or コスト 最小化	2 台	-20% 87%	2865秒 保線区配 備計画作 成時
	通トン 環境						
NBS	道床不良 (NBS可能)	時期, 区間, 所要日数	総移動距離 最小化	3 台	-50%	3600秒 打ち切り 作業日決定モデルの場合	
DGS	道床不良	全作業割り 付け	総移動距離 最小化	4 台	-3.6%	3秒 作業日所与モデルの場合	

例えば、軌道状態の診断や予測に関する統計モデル、また保守計画作成のための数理計画モデルが構築された。このうち、種々の大型機械に対応する保守計画モデルの構造を表3に示す。本モデルにより、保守箇所を選択する、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、大型機械の運用を含む保守計画を作成できる。

以下では、これらのモデルの開発実績と概要を、数理科学の応用という観点で示す。

3.1 軌道狂い保守計画モデル

従来の軌道狂い管理では、直近の検測値と管理値を対照し、検測値の方が大きい、或いは検測値が管理値に近い場合に保守する形態が一般的であり、予測が行われない等、データの活用は十分ではなかった。そこで、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することで、軌道狂いの将来推移の予測を可能とした (T. Oyama et al. (2006))。

また、軌道狂い保守に用いられる MTT (1 台) の効率的な運用を考慮した保守計画の作成モデルを図1のように構築した (三和, 大山 (2013))。一般に、軌道狂いは 100 m 等のロット単位で管理されるのに対し、保守は数 100 m 単位で連続的に行われるため、各ロットの軌道狂いを考慮して保守区間を切り出す必要がある。そこで、「保守区間選択モデル」と選択区間に保守時期を与える「保守スケジュール作成モデル」を構築した。保守区間選択モデルは、選択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ものであり、数理計画モデルにおいて有名なナップサック問題が応用されている。保守スケジュール作成モデルについては、構築当時の鉄道事業者の考え方に近い「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する」という目的関数を用いたが、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

図 1 軌道狂い保守計画モデル

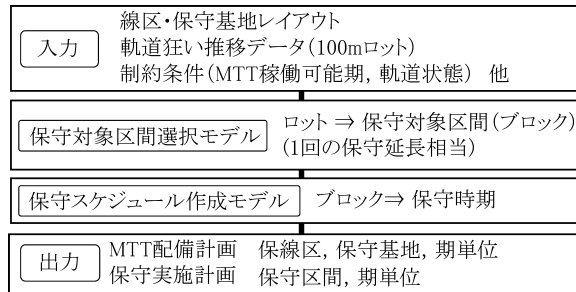
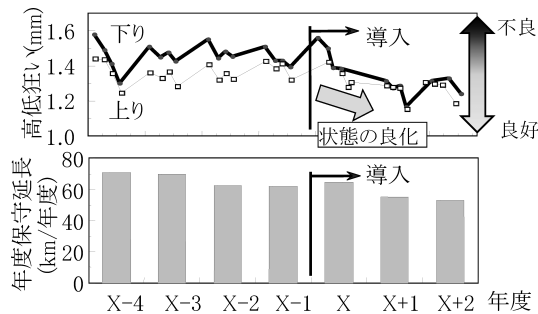


図 2 軌道狂い保守計画モデルの導入効果

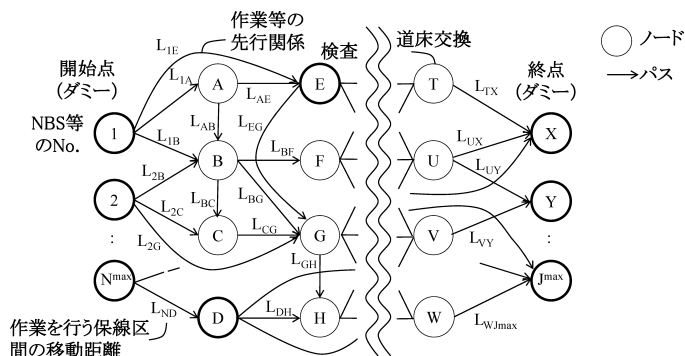


る」目的関数も適用可能とした。一方、本モデルは数千～1万個程度の整数変数を有する大規模モデルであるため、計算時間の短縮が実用化の課題であった。そこで、一部変数の整数条件を緩和しても整数解が出力されるモデル構造に改良し、短時間で整数最適解を得られるようにした。

本モデルにより、ある線区における年度保守計画を作成して当時の実績と比較・分析した結果、本モデルで得られる計画の質は十分に高いことが確認されたため、本モデルは実線区に導入された。導入前後の軌道状態、保守量の推移を図2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、導入効果を確認できた。特に、導入前は下り線の方が軌道狂いは大きかったが、導入により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。

更に、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を考慮して、本モデルを複数台MTTの広域運用に対応したモデルに発展させた(三和ほか(2014))。本モデルでは、現業区別に保守箇所を選択して集約し、各現業区における保守箇所数や保守期限を考慮した上で、各現業区へのMTT運用計画を出力する。そして、この出力を考慮し、現業区別に各保守箇所への保守時期を決定する。このようなモデルの階層化構造により、短時間で計画を得られるようにした。適用例を先掲の表3に示す。

図3 道床交換計画モデルの構造



3.2 材料保守計画モデル（レール削正，道床交換等）

材料保守計画の最適化に関する一部のモデルの構造と適用例を先掲の表3に示す。以下に各モデルの概要を示す。

(1) 軌道材料状態評価モデル

材料劣化は軌道狂い保守頻度に影響を与え、また軌道保守費の多くを軌道狂い保守が占めていることを考慮して、履歴データから選択した軌道狂い保守の多頻度箇所においてレール・道床状態を評価し、レール削正・交換，道床交換の要否を出力する（三和ほか（2012））。その上で、今後5年程度の期間における各保守の実施年度を出力する。保守区間の選択には、軌道狂い保守計画モデルにおける保守区間選択モデルと同様の数理計画モデルを用いている。

(2) レール削正計画モデル

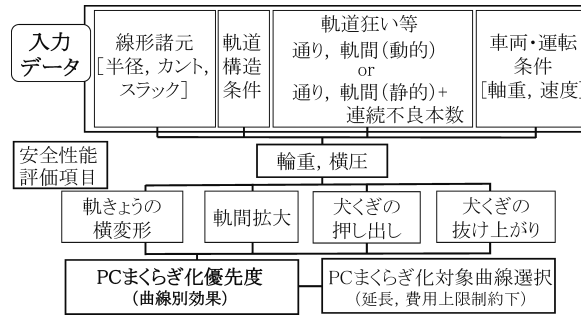
軌道狂い保守計画モデルを改良し、レール削正車の運用を考慮したレール削正計画モデルを構築した（田中ほか（2009））。本モデルにより、過去の年度の計画を作成した結果、十分に効率的な計画を作成できることが確認された。

(3) 道床交換計画モデル

複数の保線区で共用され、広範囲に運用されている道床交換用機械（NBS, DGS）の運用計画を作成するモデルを構築した（三和ほか（2021））。入力データには、各保線区間の距離の他、各箇所の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、各機械の検査計画等の制約を与える。そして、各NBS, DGSに作業を割り当てて運用計画を作成する。この際、各機械の移動距離の総和が最小になるように計画を作成する。

本モデルは、図3に示すように、各作業や各機械の検査をノードとし、各パスに移動距離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

図 4 PC まくらぎ化計画モデル



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数理計画法が用いられている。

本モデルにより道床交換の年度計画を作成した結果、例えば NBS については当時の実績の約半分の移動距離で済む計画を得られる等、効率的な道床交換計画を作成できた。

3.3 リスクや安全性に関する軌道保守計画モデル

(1) PC まくらぎ化計画モデル

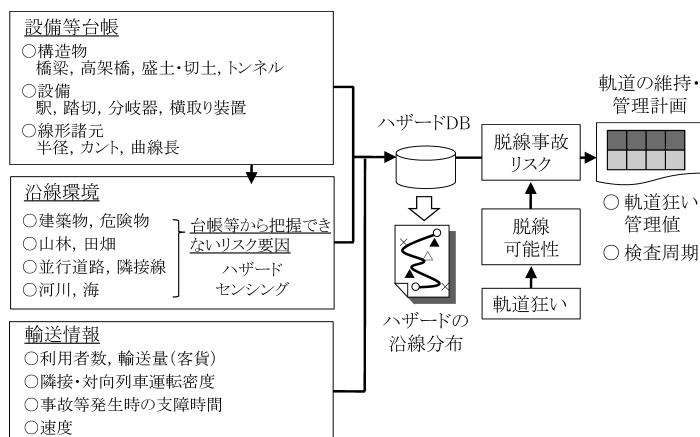
木まくらぎ軌道では、まくらぎの腐朽が進むとレールのまくらぎへの締結力が低下し、列車通過時に作用する横圧（車輪からレールに作用する横方向の力）により軌間（左右レール間の距離）が拡大し、車輪がレールから落下する軌間内脱線に至ることがある。

軌間内脱線の発生を防止するため、腐朽の恐れがないコンクリート製まくらぎ（PC まくらぎ）に交換する「PC まくらぎ化」が行われることがあるが、多くの費用を要するため、安全性向上効果の高い箇所に優先して行う必要がある。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図 4 のように構築した（金丸ほか（2016））。線形諸元、軌道構造、軌道狂い、車両・運転条件を入力して安全性を評価し、優先度を算定する。本評価では、国が定める軌道の設計法で考慮する 4 項目により安全性を評価する。そして、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。その後、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な曲線群を整数計画モデルにより選ぶ。

(2) 脱線事故リスクを考慮した維持管理モデル

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。このような箇所では、軌道狂い管理値や検査周期を厳しく設定することがリスク管理上は適当と考えられるため、軌道のリスクベースメンテナンス（RBM）モデルを図 5 のように構築した（清水ほか（2019））。本モデルでは、脱線後の車両の挙動次第で

図5 リスクベースメンテナンスモデル



被害が拡大する要因（①建築物や橋脚等の構造物への衝突，②公衆（自動車，人）への衝突，③高所からの転落）の存在の沿線分布を作成し，各箇所の軌道狂いを用いて算出した脱線発生確率と想定被害の積によりリスクを推計する。そして，この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算出することで，線区の安全性・信頼性を向上する。

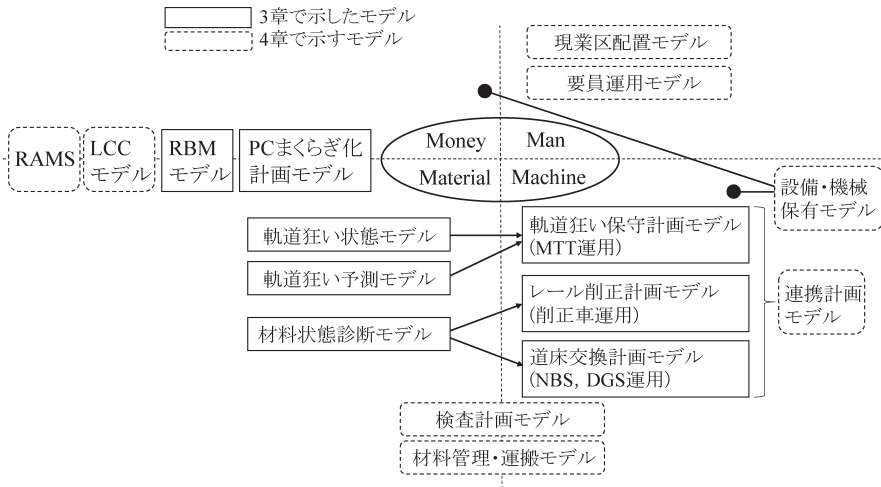
4 今後の軌道の維持管理の効率化のための課題と解決の方向性

前章では，軌道の維持管理の効率化のために，これまで数理科学を応用して構築してきたモデルを概観した。これらのモデルについて，生産現場等で用いられる管理要素 4M（Man, Material, Machine, Money）の観点で分類したものを図6に示す。構築したモデルの多くは，Material と Machine に関係しており，個別の業務の効率化を指向したものであったといえる。また，Money に関するモデルは少なく，Man については実績がない。これらは，元々ニーズが低かったということもあるが，各鉄道事業者で独自の運用を行っているケースが多く，汎用的なモデルとしての構築が難しかったことが理由として考えられる。一方，本章の以下で言及するモデルについても同図に示したが，保線業務の効率化を更に進めるといふ観点では，個別の業務を連携させて総合的に効率化を図る，保守だけでなく検査も効率化の対象とする，Man, Money に関わる部分についても対象を拡大する等といったことが挙げられる。これらの観点は，先述のようなコスト削減と労働力不足のニーズに対応したものであり，従来のような担当者に依存した仕組みをできるだけ減らすことを期待できる。

以上のように，維持管理の効率化を引き続き推進するためには，今後も数理科学を用いた課題解決を進める必要がある，そのアプローチには以下の2つが考えられる。

1つは，これまでに構築したモデルの精度を向上し，効率化を更に進めるものである。特

図 6 数理モデルの整理



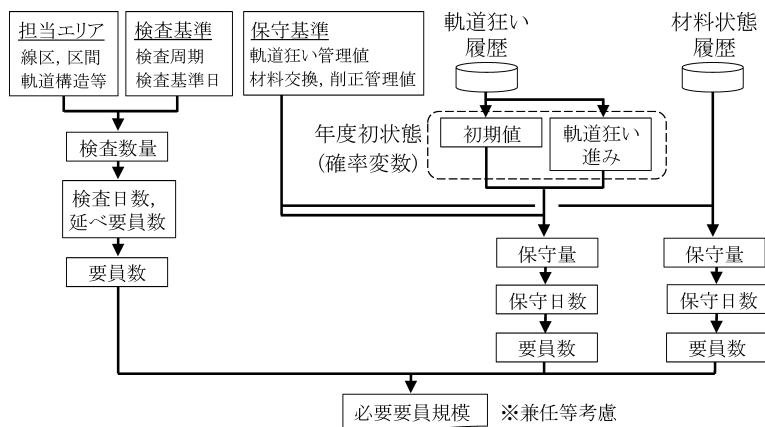
に、実用化したモデルを運用して得られ、蓄積される新たなデータを活用してモデルの構造とパラメータを見直し、モデルの精度や実用性、操作性を向上することで、モデルの価値を更に高められる。もう1つは、新たな課題を想定・明確化し、その解決のためのモデルを新規に構築するものである。ここでは、特に近年の経営環境の変化を考慮してモデルを構築し、また従来と異なる新しい価値観の導入や、これに基づく業務手順の刷新等も提案することで、鉄道事業の持続可能性を高められると考えられる。

以上のことから、以下では鉄道事業に関する近年の環境変化を考慮した上で、今後必要になると考えられる新たな軌道維持管理モデルの構築の方向性をまとめる。

4.1 鉄道ネットワーク再構築への対応

JRでは、1987年の分割民営化以降、地方交通線の一部は廃止されたものの、基本的には分割民営時のネットワークを維持しながら鉄道事業を運営している。その収支構造は、新幹線や都市部の路線や関連事業で得た利益を地方交通線の維持に充てるという内部補助が基本であり、これによりネットワークの維持が図られてきた。しかしながら、人口減少やモータリゼーションによる鉄道利用者の減少に加え、新型コロナウイルス感染症の拡大によるリモートワーク、web会議の導入・普及と外国人旅行者の減少により、全体的な利用者が減少し、上述の収支構造の維持が困難な状況にある。こうした状況の中、国の「鉄道事業者と地域の協働による地域モビリティの刷新に関する検討会」は、2022年7月に地方交通線の今後のあり方を提言し、国、地方自治体、鉄道事業者が協力して地域公共交通の再構築に取り組むことを求めている（鉄道事業者と地域の協働による地域モビリティの刷新に関する検討会（2022））。その中には、BRT、バス等へのモード転換を含めた地域モビリティの刷新が

図7 現業区の規模の検討モデル



含まれていることから、今後、鉄道ネットワークが従来と異なる形に再構築される可能性がある。このため、特にJRのような大きなネットワークを有する鉄道事業者では、管理対象とする軌道の延長や使用条件の新しい形に対応した管理への移行が必要になると考えられる。

以上のように想定される変化を考慮して課題を整理し、数理工学を活用した解決の方向性を考える。

(1) 現業区の数、配置、規模と担当範囲の再構築

軌道の維持管理を担当する現業区（保線区）の数や配置、規模、担当範囲は、ネットワークの再構築に応じて見直す必要が生じると考えられる。従来に見直しでは、過去からの継続性を考慮し、隣接する2保線区を統合するといった、ネットワークの一部範囲で完結するような例は存在したが、ネットワーク全体を対象とした大規模な見直しについては、汎用的な検討モデルが存在しないため、構築する必要がある。構築時の観点を以下にまとめる。

まず、現業区の箇所数と担当範囲については、ネットワーク全体をまとめて1つの問題（各現業区の担当範囲への分割問題）と考えて箇所数と分割境界を変数とすると、特に境界の候補は無数に存在し、またこれに箇所数も変数として加えると、極めて大規模な組合せ最適化問題になってしまう。よって、箇所数と担当範囲については予め適当な数の候補を作成し、分析結果を比較して妥当性を評価するのがよいと考えられる。なお、箇所数については、検査・保守の数量と1つの現業区が対応できる数量との関係から、大まかな必要数を推計できるため、それを参考に設定することが考えられる。

担当範囲が与えられると、そこに含まれる線区の情報や検査、保守のルールを用いることで、検査や保守の必要量や要員数を図7のように検討できる。

検査はレール等の対象ごとに検査の周期や時期が決まっているため、担当範囲内における

検査対象の敷設延長等を把握できれば、検査の数量を見積もることができる。保守については、レールのように通過トン数が管理値に達すると交換されるような時間基準保全の適用対象では、車両・運転条件等の使用条件と保守基準により保守量を推定できる。一方、軌道狂いのように検査結果に基づいて保守の是非を判断する状態基準保全の適用対象では、過去の劣化推移データや保守実績データを分析して劣化指標の将来推移を予測し、予測値が管理値を超える箇所には保守を行うと考えて保守量を推定できる。但し、予測では、劣化指標の初期値や劣化速度は確率変数と考えられるため、その変動の程度を考慮する必要がある。よって、劣化速度等を様々に変えて保守量を推定するシミュレーションが有効と考えられる。

検査や保守の数量を推定できると、その実施に必要な日数に換算できる。そして、実施に必要な作業者数や保安担当者数、また外注で行う場合には現地立会者数等を算定することで、各現業区における必要要員数を検討できる。

ところで、必要要員数については、1960年代に列車荷重、軌道構造、線路等級を考慮して推定する Y 式が国鉄で下記のように提案された（佐藤（1978））が、それ以降、同種のモデルの提案例はない。このことは、実際の要員数の検討では、様々な条件を考慮する必要がある、単純なモデルでは表せないことが背景に存在すると考えられるが、現業区の規模の検討において、要員数決定の問題は大変重要である。よって、改めて種々のデータを分析し、汎用性の高い検討モデルを新たに構築できるとよい。

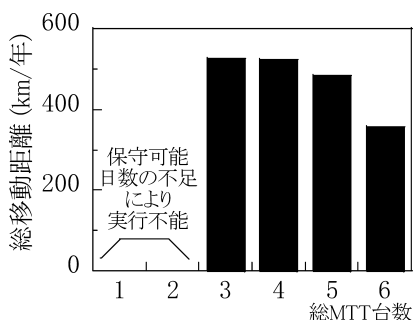
$$Y = a + b_1 \cdot p \cdot L \cdot M + b_2 \cdot T \quad (1)$$

Y ：要員数/km, a, b_1, b_2 ：係数, p ：保守係数, L ：荷重係数, M ：構造係数, T ：通過トン数

次に、現業区の配置については、どこでも自由に配置できるわけではないため、幾つかの候補箇所から選択するのが現実的と考えられる。この際、異常時への対応や復旧能力を考慮する必要がある。即ち、現業区の重要な業務として、軌道の検査・保守や巡視等の定常業務に加えて、事故、災害発生時には現場へ出動し、状況確認や救援、本社等への報告や運転再開のための安全確認等の対応が必要である。現業区の配置が現場への出動に不便な場合、こうした対応に時間を要することになり、サービス低下につながる。よって、様々な事象を予め想定して異常時の対応能力や復旧能力を考慮し、適切な配置を検討する必要がある。これについては、事業者のポリシーに基づく意思決定であるため、数理科学は余り貢献しない。

以上の他、大型機械の留置や検査で使用する保守基地の配置も再構築対象になると考えられる。特に、保守基地が必要以上に多い場合には、保守基地の集約による維持費の削減は効率化に有効であるが、機械の機動性は低下するというトレードオフが存在する。よって、シミュレーション等の数理科学モデルを応用して解決することが考えられる。

図8 MTT保有台数の検討



(2) 保有設備，機械類の台数，運用の適正化

管理対象とする軌道延長に応じて，検査や保守に必要な設備，機械の保有台数や運用を適正化する必要がある。例えば，大型機械は多額の更新費の他，定期点検等にかかる維持費を要し，また機械をリース契約で導入している鉄道事業者では，リース料の支払いが必要である。設備についても更新，検査の費用や不具合発生時の修繕費が必要である。よって，設備や機械の台数を適正化することで，固定費を低減し，維持管理の経済性を向上できる。

こうした保有設備，機械台数の見直しに適用可能なモデルとして，3.1や3.2で述べた複数台の大型機械の運用計画モデルが考えられる。本モデルを用いたMTTの保有台数の検討例を図8に示す（三和ほか（2014））。本条件では，3台以上のMTTが必要であること等を確認できる。しかしながら，表3に示したように，本モデルでは7台程度までしか適用実績がなく，台数が多い場合には数理計画モデルが大規模になり，最適解の探索に時間がかかる等の問題の発生が懸念される。また，軌道狂いの予測を100mロットで行うため，全社規模の問題ではロット数が膨大となり，モデルの入力データの作成に長時間を要する。更に，軌道狂いの初期状態や劣化速度によって必要保守量は増減するため，初期状態等の変動（ばらつき）を考慮して台数の適正值を検討する必要がある，これに要する計算量の増大も懸念される。

以上のことから，軌道狂いの初期状態や劣化速度をパラメータとし，線区の軌道状態をマクロに評価して必要保守量を見積もり，設備や機械の保有台数の適正值を簡単に検討できるモデルの構築が考えられる。例えば， $t+1$ 年度の軌道狂い（線区平均値） $\overline{\sigma}_{t+1}$ については， t 年度の軌道狂い $\overline{\sigma}_t$ 等を用いて，以下のように表すことができる。

$$\overline{\sigma}_{t+1} = \overline{\sigma}_t + \Delta\overline{\sigma}_t - r \left[\frac{L_y}{L^{\max}} \left\{ c \left(\overline{\sigma}_t + \frac{\Delta\overline{\sigma}_t}{2} \right) + d \right\} \right] \quad (2)$$

$\Delta\overline{\sigma}_t$: t 年度の軌道狂い進み， r : 保守効果の現れ方に関する補正係数， L_y : 保守延長， L^{\max} : 線区延長， c, d : 保守改善量推定式の係数

各線区における履歴データに基づいてパラメータを設定し、更に $t+1$ 年度に実現したい軌道状態を設定することで、必要保守量 L_y を算出できる。そして、この保守量を MTT の必要稼働日数に換算し、全線についての総和を算出すると、全社における必要稼働日数を推定できる。これにより、MTT1 台あたりの年間稼働日数（地域によって異なる場合があれば、考慮する必要がある）を設定し、この値で必要稼働日数を除することにより、必要台数を得られる。以上を基本条件における結果とし、初期状態や劣化速度を確率変数として様々に変えてシミュレーションを行うことで、適正台数を算出する。

以上の他、設備、機械の運用についても、軌道延長の変化に応じて適正化する必要がある。特に、ネットワーク構造が変化する場合には、従来の運用から大幅に変わる可能性が高い。

4.2 検査、保守の基準の適正化

(1) 検査時期の適正化

軌道の検査周期は、国土交通省告示において在来線では1年、新幹線では軌道狂いは2ヶ月、その他は1年と定められており、鉄道事業者では軌道構造や輸送条件を考慮し、告示の値より短い検査周期を定めている場合が多い。一方、例えば直線や緩曲線（半径の大きな曲線）では、レールの側摩耗は短時間で大きく増えない等、対象によっては現状が十分に健全であれば、突発的に発生する異状を徒歩巡視等によって把握できる条件の下、次の検査時期は暫く先でも問題ないと考えられる。一般的な状態監視保全方式では、安定状態における検査周期 T_m は以下のように表せ、また故障率が増加するような劣化進行過程では、残存寿命の $1/3 \sim 1/2$ 程度を次の検査時期に設定できる（豊田（1992））。

$$T_m \propto \sqrt{MTBF} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{C_b}{C_p}}} \cdot \sqrt{\frac{P_0}{1+\beta}} \quad (3)$$

$MTBF$ ：平均故障間隔， C_b ：事後保全費用， C_p ：予防保全費用， P_0 ：検出率， β ：見落とし率

よって、履歴データを十分に蓄積し、将来の推移を精度よく予測できるのであれば、次の検査時期を劣化状態に応じて決めることができる。軌道の状態は、その構造や敷設時期、使用条件等によって様々であるため、検査周期を個々の状態に応じて柔軟に設定できることは、過剰な検査を削減でき、検査数量の適正化に有効である。

但し、軌道狂い検査のように、検測車が線区を連続的に走行して測定するような対象については、短い区間ごとに異なる検査時期を設定しても有効性を発揮できないため、上記の考え方はスポット的に検査を行う対象について有効である。また、検査周期を柔軟に設定できると、個々の設備、機械により検査時期が異なることになり、管理が煩雑になる点が問題で

線路の維持管理効率化のための数理科学的技術の開発実績と課題解決への方向性

ある。よって、検査のシステム化、自動化等の体制を整備してヒューマンエラーを排除し、必要な検査が失念されて事故等に至ることがない形で導入することが望ましい。

上記のような状態基準検査を行うためには、状態予測モデルや最適検査周期（時期）の検討モデルの構築が必要であり、数理科学の活用を期待できる。

(2) 状態評価指標の適正化

軌道の維持管理では、脱線事故や輸送障害の発生の防止が重要であり、軌道狂い管理では管理値が線区別に定められ、「検測値と管理値の対照」により保守の是非を判断する管理法が基本である。この管理法では、一般的に脱線事故が発生しやすいのは急曲線であるのに対し、一部の鉄道事業者を除いて、同じ線区内では線形に関係なく同じ管理値が用いられている。このため、脱線の要因にならない程度の軌道狂いであっても、管理値に到達した場合には保守が必要となるため、保守を過剰に行ってしまう可能性がある。一方、脱線事故の発生メカニズムについては、この20数年で解明が進み、脱線に至る可能性が高い軌道狂いの条件が明確になってきた（内田ほか（2001））。よって、3.3で述べたRBMを保守箇所を選定等といった日常管理にも導入し、優先度の高い箇所への保守を基本とすることで、安全性を維持・向上しながら効率化を図れると考えられる（三和ほか（2019））。同様に、脱線事故には至らないが、著大な軌道狂いの発生に伴う列車の運転中止による輸送障害は、特に利用者の多い線区では影響が大きいことから、これを考慮したRBMも可能と考えられる。

RBMの導入法としては、検測車による検測の度に、各箇所の脱線事故の発生確率やリスクを算定し、これらが大きな箇所を保守箇所とすることが考えられる。また、保守計画への反映方法としては、例えば3.1で述べた軌道狂い保守計画モデルの目的関数において軌道狂いの項にリスクの項を追加し、軌道狂いとリスクの両方を考慮した保守計画を作成できる。

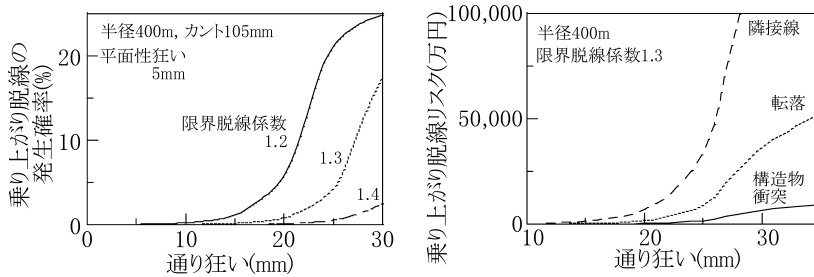
このRBMは、CBMにおける個別管理の考え方を更に進めた合理的な管理法である。一方で、現地で保守する際、従来はメジャーにより軌道形状を測定して仕上がり状態を確認できたが、脱線発生確率やリスクを現地で確認することは、実務上、難しい。よって、現地で測定した形状から確率やリスクを簡単に算出すると共に、仕上がりที่ไม่十分な場合には、どの軌道狂いを改めて整正すべきかを提示できるような支援システムの導入が必要と考えられる。

RBMの導入には、脱線事故発生確率やリスクの推計が必要であることから、その検討例を以下に示す。

○脱線事故に関するリスクの推計

想定する脱線としては、乗り上がり脱線と軌間内脱線を対象とする。乗り上がり脱線は、曲線部での通り狂い（左右方向の軌道形状の不整）や平面性狂い（軌道のねじれ）が大きい

図 9 脱線事故の発生確率とリスクの推計結果



場合に、発生する脱線係数が限界脱線係数を超えて起きる。一方、軌間内脱線は、主に木まくらぎの腐朽等によるレール締結力の低下により軌間が拡大して発生する。

リスクについては、各脱線の発生確率と発生時のコストの積により推計する。発生確率については、軌道狂いと線形諸元、車両・運転条件を考慮して推計する。コストについては、車両・運転条件、軌道敷設条件、列車条件、脱線後車両の挙動に応じて被害が拡大する様々な事象（例えば、構造物への衝突、高所からの転落、隣接線車両との衝突）や被害者数、車両被害等を想定して推計する。

乗り上がり脱線の発生確率の算出例と、通り狂い、軌間狂いの初期値をパラメータとしてリスクを推計した例を図9に示す。軌道狂い、想定被害の大きさに応じて発生確率やリスクが増減することを確認できる。

○輸送障害に関するリスクの推計

軌道狂い x に応じた輸送障害時のリスク $E(x)$ としては、運転支障時間 h の期待値に想定影響人員 N 、時間評価値 c 、輸送障害の発生確率を乗じて推計する。

$$E(x) = N \cdot c \cdot \text{Prob}(x + \Delta x > x^*) \cdot \int_0^{\infty} hg(h) dh \quad (4)$$

Δx : 軌道狂い進み, $g(h)$: 運転支障時間 h の確率密度関数, x^* : 管理値

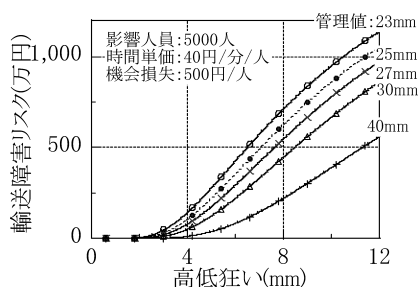
高低狂い（上下方向の軌道形状の不整）の管理値超過に伴う輸送障害リスクの推計例を図10に示す。高低狂いが大きいと輸送障害リスクが増え、また管理値に応じてリスクは変動することがわかる。

4.3 検査、保守の業務体制の再構築への対応

(1) 業務外注化

鉄道事業者では、管理の効率性、生産性を向上するために、管理業務の外注化が進められており、今後は更にその範囲が拡大される可能性がある。但し、ノウハウが必要な業務を外

図 10 輸送障害に関するリスクの推計結果



注化する場合，そのノウハウが外注先へ適切に移転されないと外注業務の品質が不十分となるため，一定のレベルの業務品質を確保できるような仕組みが必要である。例えば，前章で述べた軌道状態診断モデルや計画モデルを外注先が使いやすい形でシステム化して利用できるようにする他，外注時の契約条件に，本システムの利用を示し，検収時には利用実績を確認するような仕組みの導入が考えられる。

(2) 集中修繕（工事）への対応

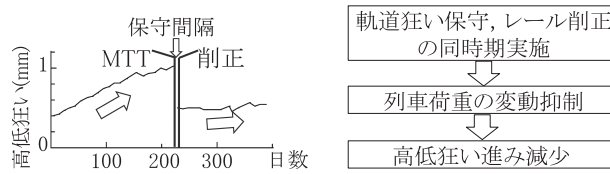
軌道の保守等は夜間に行われることが多く，視認性が悪い他，複線区間では隣接線を列車が走行する危険な環境下にある。また，作業が可能な時間が短いため生産性が低く，作業員の生活が不規則になりがちである。更に，こうした労働条件は近年の労働嗜好に合わず，作業員の確保が難しい要因になっている。このため，昼間に営業列車を運休し，長い作業時間を確保すると共に，大型機械を集中的に用いることで，生産性や安全性が高く，また労働環境が良好な保守形態の導入が進んでいる（細馬ほか（2022））。

集中修繕（工事）の実施に際しては，工事区間や保守内容の選定を軌道材料の劣化状況等に基づいて担当者が行っている。よって，前章で示した軌道状態診断モデルやPCまくらぎ化計画モデルを，実施効果の高い区間の選定や保守内容の決定，また複数年度にわたって継続的に行う際の長期的な計画の策定に活用できると考えられる。特に，設備更新や性能向上に際しては，LCC（Life Cycle Costing）の観点が重要であることから，数理科学の活用により，LCCに基づく最適な更新等の計画を策定できるモデルの構築が必要である。

4.4 既存設備，機械の有効活用による保守周期の延伸

例えば，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低減できるため，図 11 のように保守後の軌道狂い進みが減少し，軌道狂い保守の時期を延伸可能であることが分かっている（松本ほか（2019））。これまで，軌道狂い保守，レール削正の計画作成のためのモデル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計画モデルを構築することで，更に経済性の高い保守計画を作成できる。

図 11 組合せ保守による保守周期の延伸



4.5 国際規格への対応

鉄道システムの信頼性、安全性については、2002年にIEC（国際電気標準会議）の国際規格としてRAMSが制定された。軌道では、2006～09年にEUで実施されたプロジェクト「INNOTRACK」において、RAMSとLCCの分析のガイドラインが検討された（INNOTRACK（2011））。今後、具体的な適用法の検討においては、数理科学の活用が考えられる。そこで、我が国の鉄道システムにおけるRAMS性能の現状を確認するために、鉄道重大事故（死傷者10人以上、または脱線車両10両以上が発生した事故）や脱線事故、輸送障害等のデータ（事故については、2017年度までに運輸安全委員会が公表した報告書のデータ。輸送障害については2005年度のデータ）を用いてRAMSパラメータを推定した例を以下に示す。

(1) RAMSパラメータ

RAMSの評価に用いるパラメータとして、R（Reliability）には事故等の平均発生間隔（MTBF）とこれに対応する故障率、A（Availability）には列車遅延時間・運休本数とアベイラビリティ、M（Maintenability）には運転支障時間（≡平均保全間隔：MTTR）、S（Safety）には被害者数を想定する。

(2) パラメータの推計結果

パラメータの推定結果を表4に示す。

1) 鉄道重大事故

・ Reliability

2017年度までの重大事故データ（全98件）から、発生間隔日数の分布を1997年の前後2期間に分けて算出した。2期間に分けたのは、発生件数が98年以降に大きく減る傾向にあったためである。この間隔の平均値がMTBFに相当し、全期間では約114日であるが、98年以降では約190日である。この分布は指数分布への適合度が高かった。指数分布は故障率一定の設備での平均故障間隔のようなランダムで独立な事象の発生間隔の分析によく用いられる。

表 4 我が国の鉄道における RAMS パラメータの推定結果

		重大事故		脱線事故		輸送障害	
Reliability	MTBF (平均発生間隔)	全体	114.19 日	全体	30.88 日	全体	0.073 日
		-1997 年度	65.49	鉄道外原因 除外	97.61	軌道原因	17.66
		1998 年度-	189.79				
Availability	列車遅延時間	全体	304.55 分	24 時間以下 の事故のみ	264.07 分	軌道原因	82.63 分
	列車運休本数	全体	235.03 本	全体	189.96 本	軌道原因	16.58 本
	アベイラビリティ	全体	0.995	全体	0.971	軌道原因	0.996
		-1997 年度	0.991	鉄道外原因 除外	0.991		
	1998 年度-	0.997					
Maintenability	MTTR (平均保全間隔)	全体	14.24 時間	100 時間以下 の事故のみ	22.21 時間	全体	7.26 時間
		脱線なし	7.51			軌道原因	1.91
		あり	20.07				
Safety	被害者数 (死傷者数)	全体	54.71 人	全体	7.24 人		
		重量物衝突 なし	23.67	重量物衝突 なし	1.65		
		あり	59.55	あり	27.81		

・ Availability

列車遅延時間を把握できた 40 件について、時間分布を分析した。上位 10 件では 500 分を超え、平均では約 300 分であり、この分布には対数正規分布の適合度が高かった。

運休本数を把握できた 60 件の事故での平均運休本数は 235 本であった。これは一部の突出して多い事故の影響を受けており、半数の事故では 80 本以下であった。

アベイラビリティについては、MTBF と後述する MTTR を組み合わせると、全期間で 0.995 であるが、98 年以降では 0.997 で 97 年以前に比べて上昇している。

・ Maintainability

データを得られた 96 件の事故のうち、運転支障時間が 100 時間を超える事故を除いた 84 件について、MTTR を算出した。約 20% の事故で 24 時間を超え、ばらつきは大きく、極端に長くなる可能性がある。平均で約 14 時間であるが、脱線を伴う事故では伴わない事故より約 12 時間長い。これは、復旧時に車両の載線や設備の修復が必要であるためと考えられる。

・ Safety

脱線車両 10 両以上の基準で重大事故に分類された事故を除く 89 件における死傷者数の平

均は約55人であった。車両の重量物への衝突の有無を区別すると、衝突を伴う事故では伴わない事故に比べて2.5倍多い。即ち、事故時の車両の挙動により事故の規模が変化する。

2) 列車脱線事故

2017年度までに運輸安全委員会が報告書を公表した173件の列車脱線事故データを分析した。MTBFは約1ヶ月であるが、この値には踏切での自動車との衝突等、鉄道外原因の事故も含まれる。そこで、こうした事故を除いて算出すると98日であった。列車遅延時間、運休本数、アベイラビリティは重大事故での値に比べると小さい。MTTRは、運転支障時間が100時間を超える事故を除くと約1日である。死傷者数は、重大事故と同様に重量物の衝突の有無による差異が明確である。

3) 輸送障害

過去の分析データにおいて算出したMTBF(2005年度)は0.073日、アベイラビリティは0.194であり、全国的には毎日何件もの輸送障害がどこかで発生していると解釈できる。MTTRは7.26時間であるが、ばらつきは大きい。ここで、軌道が原因の輸送障害に限定して分析した結果、MTBFは17.7日、アベイラビリティは0.996、MTTRは1.91時間であった。輸送障害については、原因を分類して分析することが必要と考えられる。

以上のように、現状の鉄道システムにおけるRAMSパラメータの値を把握できたことから、今後は様々な条件を考慮してパラメータを推定できるように、影響する要因や程度を把握し、汎用的な数学モデルを構築することが課題である。

5 おわりに

鉄道事業者が置かれている経営環境は年々厳しくなり、業務の自動化、省力化、最適化は急ぎ解決が必要な重要課題である。軌道の維持管理についても、人、機械、予算、設備の配置・配分・規模・運用の最適化等の課題が山積しており、その解決に数理工学的手法やアプローチの活用が大きく期待されている。特に近年では、計算機やAI、画像処理技術の進歩が著しいことから、こうした新技術と適切に融合させることで、維持管理の仕組みを大きく刷新できる可能性がある。よって、幅広い分野の技術と数理工学的技術をうまく組み合わせ、鉄道の持続可能性を高めることが重要である。

参考文献

細馬一起, 難波強志, 東條哲也 (2022) 「昼間拡大間合いを活用したローカル線の保守」新線路, Vol. 76, No. 8, pp. 16-18

線路の維持管理効率化のための数理科学的技術の開発実績と課題解決への方向性

- INNOTRACK (2011) “Guideline for LCC and RAMS Analysis”, International Union of Railways
- 金丸清威, 三和雅史, 片山雄一郎 (2016) 「PC まくらぎ化計画システムの開発」鉄道総研報告, Vol. 30, No. 10, pp. 47-52
- 葛西亮平, 西藤安隆, 小松佳弘, 小木曾清高, 矢作秀之, 小西俊之 (2016) 「線路設備モニタリング装置の概況と今後の方向性」JR EAST Technical Review, No. 55, pp. 21-24
- 松本麻美, 三和雅史 (2019) 「鉄道軌道の維持管理のための組み合わせ保守手法に基づく効率化の提案と検証」交通と統計, Vol. 54, pp. 45-59
- 三和雅史, 木村寛淳, 山中雅司 (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, pp. 13-18
- 三和雅史, 西島悠太, 矢坂健太, 松本麻美, 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, Vol. 77, pp. 260-279
- 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, Vol. 69, pp. 160-175
- 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, Vol. 75, pp. 11-28
- 三和雅史, 矢坂健太, 吉田尚史, 松本麻美, 佐々木陽, 松丸和貴 (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, pp. 35-40
- 佐藤裕 (1978) 「軌道力学」鉄道現業社, pp. 61-62
- 清水淳, 三和雅史 (2019) 「画像解析技術を活用した軌道のリスクベースメンテナンス法の開発」鉄道総研報告, Vol. 33, No. 2, pp. 5-10
- 田中博文, 福山幹康, 三和雅史 (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, pp. 5-10
- 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, pp. 167-175
- 鉄道事業者と地域の協働による地域モビリティの刷新に関する検討会 (2022) 「地域の将来と利用者の視点に立ったローカル鉄道の在り方に関する提言」, 国土交通省
- T. Oyama, M. Miwa (2006) “Mathematical Modeling Analyses for Obtaining an Optimal Railway Track Maintenance Schedule”, Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, Vol. 23, pp. 207-224
- 豊田利三 (1992) 「予知保全 (CBM) の進め方」日本プラントメンテナンス協会, pp. 118-123
- 内田雅夫, 高井秀之, 村松浩成, 石田弘明 (2001) 「輪重横圧推定式による乗り上がり脱線に対する安全性評価」鉄道総研報告, Vol. 15, No. 4, pp. 15-20