

# 数理最適化技術が高める鉄道事業のサステナビリティ

東京経済大学  
三和雅史

## 1. はじめに

鉄道システムにおいて、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）<sup>1)</sup>。このため、安全で快適な列車の運行を目的として、これらの状態を把握するための検査が定期的に行われ、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、その検査や保守には多くの人手を要し、また劣化状態の診断や評価に熟練を要する業務が多い。よって、労働力不足や収入減少の時代を迎えた現在では、人に依存した管理からの脱却が大きな課題である。

筆者は、30 年弱にわたって、鉄道の研究機関において、主に軌道の維持管理の効率化や輸送の安全性向上に関する研究に携わってきた。そして、上記の課題の解決手段として、オペレーションズ・リサーチの各種技法を活用してきた中で、数理最適化技術は維持管理計画の高品質化に大きく貢献してきた<sup>2)</sup>。今後、鉄道事業のサステナビリティを更に向上させ、社会の重要インフラとして機能し続けるために、数理最適化技術への期待は、ますます高まると考えられる。そこで、軌道を対象として、これまでに数理最適化技術を適用した事例を体系的に整理することで、今後の適用の参考とすると共に、課題や社会実装上の留意点と将来の適用の方向性をまとめた。

## 2. 軌道の検査と保守<sup>1)</sup>

前述のように、軌道は劣化が進行するため、主として表 2.1 に示すような方法で検査・保守が行われる。例えば、軌道狂いは、JR では新幹線で 10 日、在来線で 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）されているが、近年では営業車による検測が実用化され<sup>3)</sup>、検測頻度が格段に増えたため、取得された膨大なデータの効率的、効果的な処理が課題になっている。一方、レール等の材料の検査は、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、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が行われている。レール凹凸についても同様の機械としてレール削正車があり、これ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、道床交換機（NBS）や道床安定作業車（DGS）といった大型機械を用いて道床交換が行われる。まくらぎについても、不良なものは交換されるが、特に木まくらぎの場合は脱線事故の防止策の一環として、腐朽しないコンクリート（PC）まくらぎに交換されることがある。

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 台程度配備される、或いはある程度広いエリアに適当な台数を配備して複数の保線区で共有し、広範囲に運用されることが多い。



図 1.1 軌道の劣化の例

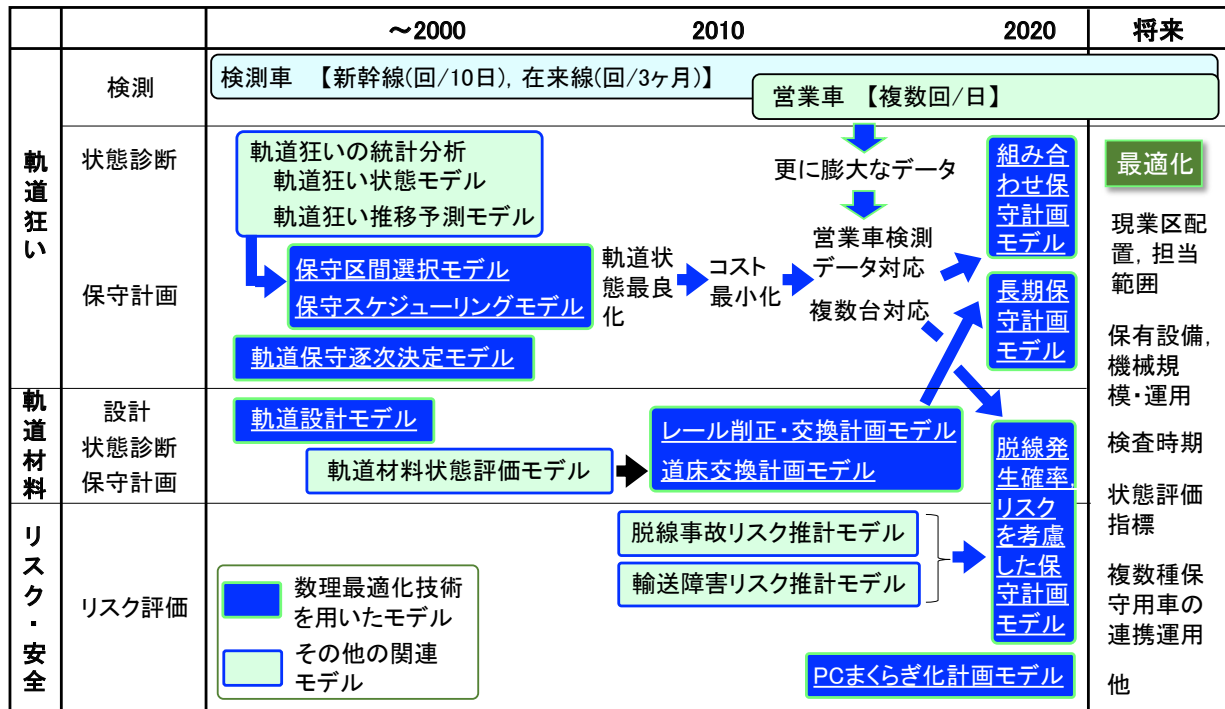
表 2.1 軌道の検査と保守の主な方法

| 項目   | 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          |



図 2.1 MTT

表 3.1 軌道の維持管理業務への数理最適化技術の適用



一般に、これらの大型機械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、保守の内容、箇所、時期の他、大型機械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、大型機械の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。

こういった保守計画の作成は、従来、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発揮して行っていた。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し、また計画の品質が担当者によりばらつく等の課題が存在していた。更に、こうした担当者が減少するだけでなく、保守作業員の確保が難しい時代になり、適切な保守計画を誰でも安定的に自動作成できるツールの開発が求められるようになっていく。

### 3. 軌道の維持管理業務への数理最適化技術の適用

数理最適化技術の優れている点として、解決対象を数理計画モデルにより表現できれば、複雑な制約条件下において目的関数を最良とする解を計算機上で比較的短時間のうちに得られることが挙げられる。また、担当者の技能に依存した意思決定の置き換えに有用であるだけでなく、意思決定の品質を向上できる可能性がある。このことから、軌道の維持管理上の種々の問題に対して、数理最適化技術の適用による解決を表 3.1 のように試みてきた。実用に至ったもの、至らなかったもの様々であるが、開発から実装までの各段階で得られた知見は貴重なノウハウとして、その後の開発案件において役立っている。そこで、こうした適用事例を体系的に整理することで、軌道のような長大設備の維持管理に適した数理最適化技術の適用法や実装上の留意点をまとめて、今後の開発における参考資料とする。

#### 3.1 数理最適化技術の適用事例と分類

軌道の維持管理業務への数理最適化技術の適用事例は、殆どが IP(整数計画問題)、MIP(混合線形整数計画問題)としてモデル化されたものである。これは、保守という action の内容や時期を決定する問題が多いため、「do」or「not」に対応した 0-1 型整数変数の使用が多かったためと考えられる。一方で、長大な軌道の維持管理計画を策定する場合、モデルの規模が極めて大きくなることもあり、定式化ができてでもソルバーで最適解を得られない、或いは求解に長時間を要する場合があった。また、適用対象が複雑な場合に、多くの制約条件が設定された結果、実行不能状態に陥る場合もあった。よって、実務上の問題を数理最適化技術の適用により解決するには、「現実的な解を得る」と「短時間で解ける」ことが課題であった。

このような課題に向き合いつつ、数理計画技術を適用した事例をモデル構築の目的の観点で分類し、以下のように整理した。

##### (1) 保守対象区間の選択

保守計画の作成では、軌道狂い保守、レール削正、レール交換、道床交換、まくらぎ交換といった、いずれの保守についても、どの区間(どこから、どこまで)に対して行うかという選択が必要である。そして、先

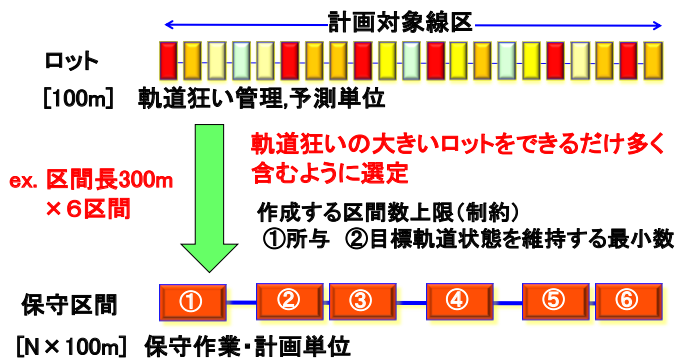


図 3.1 軌道狂い保守区間選定モデル

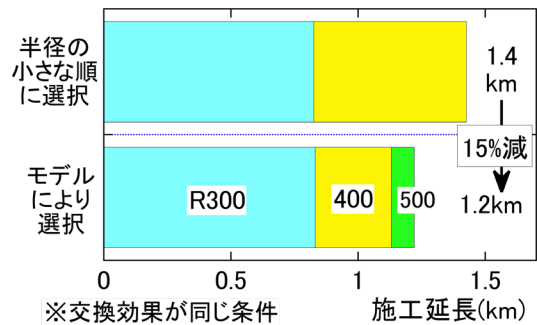


図 3.3 木まくらぎ交換曲線選定結果

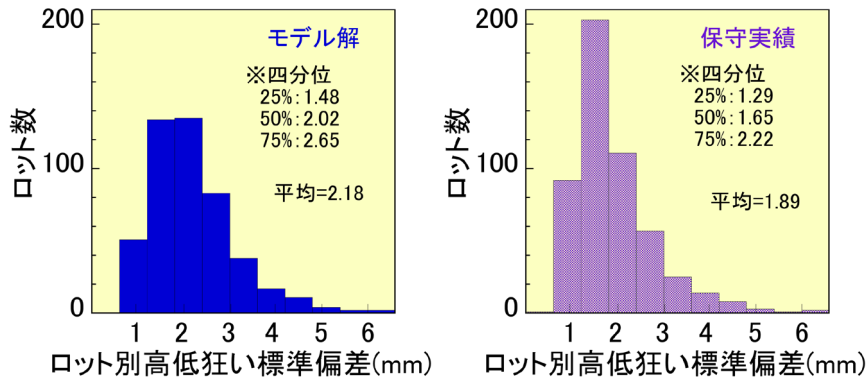


図 3.2 軌道狂い保守対象区間選定モデルの適用結果

に述べた大型機械を用いて保守する場合、線路上を移動させる回送作業が必要であるため、一晩に多くの作業を行うには、近接した箇所をまとめて保守する方が回送時間を減らせて効率的である。一方、保守が可能な年間あたりの日数や延長は予め決まることが多いため、全線を保守することは不可能である。これらの結果、一部区間を幾つか選択して保守することになるため、保守効果ができるだけ大きい（≡軌道状態ができるだけ悪い）区間を切り出す形で保守対象区間は選択される。

以上に述べた保守対象区間の選択は、1回の保守あたりの区間長さが決まっていれば、その始点を決める0-1型整数を有するIPとしてモデル化できる。またIPの代表的な問題であるナップサック問題に近い形でモデル化できる。ナップサック問題では、ナップサックに入れる製品を選択する/しないの決定が問題になるが、例えば軌道狂い保守区間の選択モデル<sup>4)</sup>では、軌道の管理単位である100m区間（ロット）を対象区間に含める/含めないことが問題となる。但し、上述のように、機械による1回の保守区間長さ分だけ連続的につながった状態で選択するという条件が付く。図3.1は軌道狂い保守区間の選択方法のイメージであるが、レール削正・交換区間の選択においても同様にモデル化できる<sup>5)</sup>。数理計画モデルの構造としては、以下のように表される。

- 変数 保守対象区間の始点を表す0-1型整数変数
- 制約条件 保守に必要な予算や数量の上限
- 目的関数 選択箇所の劣化状態指標の総和 ⇒ 最大化

また、必ず保守すべきロット（軌道狂いが管理値を超過する可能性が高いロット等）については、できるだけ少ない保守対象区間数で全てカバーする必要がある。この点については、IPの代表的な問題である集合被覆問題としての側面も有する。つまり、保守対象区間の選択モデルは、ナップサック問題と集合被覆問題を組み合わせたモデルであるといえる。

以上のモデルは、最適解を短時間で得られる性質を有しているため、軌道狂いや軌道材料の保守対象区間の選択に広く用いられた。図3.2は軌道狂い保守対象区間をモデルと担当者が選択した場合を比較したもの<sup>4)</sup>であるが、モデルで選択した場合の方が、状態が悪い箇所を選択できたことがわかる。また、図3.3は、木まくらぎ交換による安全性向上効果が同じになる条件で交換対象曲線をモデルにより選択した場合と曲線半径の小さな順に選択した場合とを比較したもの<sup>6)</sup>であるが、モデルで選択した場合の方が、少ない延長で安全性を向上できることがわかる。

以上のように、劣化状態に基づいて保守対象区間を選択する問題には、数理最適化技術は適用しやすく、また効果を把握しやすいため、類似の適用対象には有効なツールになり得る。

上記のモデルのうち、軌道狂いやレール削正の区間選択モデルについては、既に実用化がなされている他、まくらぎ交換区間の選択モデルについても、web版でのソフトウェア化がなされる<sup>7)</sup>等、活用が進んでいる。

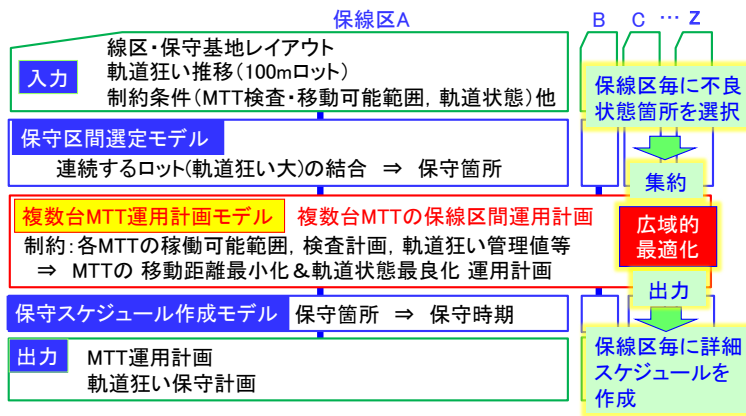


図 3.4 軌道狂い保守計画モデル

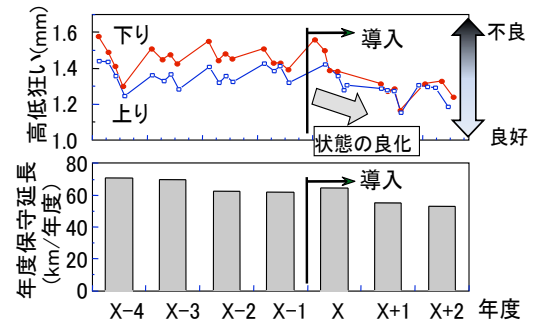


図 3.5 軌道狂い保守計画モデルの導入効果

## (2) スケジューリング

上記(1)で選択された、或いは事前に指定された保守対象区間に対しては、保守時期を決定する必要がある。その際、どの大型機械が、いつ、どの区間の保守を担当するかも決定する必要がある。そのため、本問題をスケジューリング問題として捉えて数理計画技術が適用された<sup>4)</sup>。この際、変数になるのは、各箇所の保守時期や担当機械 No.であるため、整数変数を用いた IP として、以下のような構造のモデルで表される。

- 変数 各時期に各対象区間において保守の実施の有無を表す 0-1 型整数変数  
各時期に各大型保守機械が配備される現業区や保守基地を表す 0-1 型整数変数
- 制約条件 劣化状態指標の管理値、保守量の上限、保守時期の指定・制限
- 目的関数 ①大型機械の総移動距離 ⇒ 最小化  
②実現する軌道状態 ⇒ 最良化

ここで扱うスケジューリング問題では、保守や機械運用の時期を割り当てる保守対象区間の数、機械台数、計画期間に対応する時定数（日、週、旬）の数の積により整数変数の数が決まるため、適用対象が広範囲の場合、機械台数が多い場合、また計画対象期間が長い場合には、モデルの規模が大きくなり、最適化計算が長時間化するだけでなく、ソルバーで解くことが難しくなる。そのため、対象とする問題を構成する現業区や保守基地、保守対象区間の位置関係、機械運用上の制約の他、実際の計画作成手順等をよく理解した上で、元々の問題との整合性を保ちながら、問題を複層構造化してサブモデルを構築し、モデルを解き進めることが考えられる。そうすることで、最終的に得られる解（計画）の妥当性や実現性を確保できる。図 3.4 は軌道狂い保守計画モデルの構造<sup>8)</sup>であるが、モデルが 3 つの階層に分けられていることがわかる。本モデルの適用対象として想定した実際の問題では、7 台の MTT が運用され、9 箇所の現業区において計 625 箇所の保守対象区間が存在していた。よって、仮に年間を 36 期（10 日単位でスケジューリングする）とし、階層に分けずにモデル化すると 15 万個以上の整数変数を有するモデルとなる。一方、本図のように階層化してモデル化すると、各サブモデルにおいて最大でも 2000 個程度の整数変数となり、ソルバーで十分に解けるレベルとなる。

図 3.5 は、ある現業区における軌道狂い保守計画モデルの導入前後の軌道狂いの推移である<sup>4)</sup>。MTT1 台の場合であるため、図 3.4 のフローにおける「複数台 MTT 運用計画モデル」がない 2 階層のモデルを適用した結果、導入以前より良好な軌道状態を少ない保守延長で実現できたことがわかる。これは、保守対象区間の選択と保守のスケジューリングの品質が、導入前に比べて向上した効果であると考えられる。上記は、軌道狂い保守計画に対するモデル化の例であるが、レール削正計画についても同様にモデル化できる<sup>8)</sup>。上記の両モデルとも、実務で用いられる等の実績があり、類似のモデルである道床交換計画モデル<sup>9)</sup>についても、実用化に向けた実証試験や検討が進められている。

このように、スケジューリング問題では、保守時期を考慮する分、上記(1)のモデルに比べて整数変数の数が多く、モデルの規模は大きい。モデルを階層化する等の工夫により、数理計画技術の適用が可能である。

以上で得られた知見を考慮して、数十年単位での軌道保守計画の最適化を目的とした、軌道の長期保守計画モデルを構築し、ここでも数理計画技術が適用した<sup>10)</sup>。本モデルは、軌道狂い保守、レール交換・削正、道床交換の各保守を何年目に実施するのが最適であるかを、長期的な経済性を考慮して検討するものである。よって、各年に実施する保守の種類が変数となる。図 3.6 は 10 年分の計画として簡略化したモデルのイメージを示したものである。元々の問題では、保守費用の全期間での総額を最小化する計画を作成するが、各年における保守延長の変動をできるだけ小さくする（平準化する）こと等が制約として求められる。ここで、全ロットを対象とした計画モデルを構築しようとする、モデルの規模が大きくなり、求解が困難であることから、一旦、個々のロットを対象として、長期的に最も経済的な保守計画を作成後、これを全ロット分、まとめた上で、各ロットの計画に近い形で保守実施年を調整し、各年の保守延長を平準化するという、2 階層のモデルにより計画を作成する。最終的に得られた計画は図 3.7 のようであり、保守量が十分に平準化されたことがわかる。なお、

### ①ロット別保守計画モデル

各ロットで総保守費用最小の計画を作成

R: レール削正 B: 道床交換  
M: MTT

| 年度   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 費用      |
|------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---------|
| ロット① | M | R | — | — | M | R | — | B | — | M  | $C_1^*$ |
| ②    | R | — | B | M | R | — | — | M | R | —  | $C_2^*$ |
| ③    | R | — | B | — | R | — | — | M | R | —  | $C_3^*$ |
| ④    | R | — | B | — | R | — | — | M | R | —  | $C_4^*$ |
| ⑤    | — | R | M | — | — | R | — | B | — | M  | $C_5^*$ |

同年度条件:  $\#R \leq 2, \#B \leq 1, \#M \leq 2$

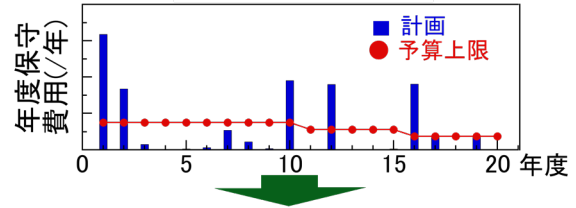
### ②全ロット保守計画モデル

上記計画からのいずれが最小になる計画を作成

|      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |       |
|------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-------|
| ロット① | M | — | R | — | M | — | R | B | — | M | $C_1$ |
| ②    | — | R | B | M | R | — | M | — | R | — | $C_2$ |
| ③    | R | — | — | B | R | — | — | M | R | — | $C_3$ |
| ④    | R | — | — | — | B | R | — | M | — | R | $C_4$ |
| ⑤    | — | R | M | — | — | R | B | — | — | M | $C_5$ |

図 3.6 長期保守計画における計画モデル

### ロット別計画モデル計算後



### 全ロット保守計画モデル計算後

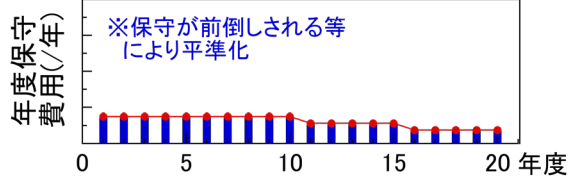


図 3.7 長期保守計画における年度別保守費用

本モデルについては、実務に適用するまでには至っていない。

ところで、スケジューリング問題を実問題に適用する場合、各箇所、或いは各保守基地、各機械、保守時期等についての様々な制約が存在するが、余りに多くの制約を設定すると、実行可能解の存在領域がなくなってしまう、計画を得られない場合がある。これに対し、Nuorium Optimizer には WCSP という求解機能が実装されており、実行可能解が存在しない場合でも、各制約の優先度を考慮しながら暫定的な解を得ることができる。計画担当者は、この暫定解に若干の修正を加えることで最終的な計画を作成でき、計画作成作業の効率化を図ることができた<sup>4)</sup>。よって、制約条件が多岐にわたるような問題に対しては、WCSP の活用も有効である。

### (3) 保守実施の逐次判断

軌道狂いを検出して得られる現在の軌道状態、また履歴データから得られる劣化速度及び保守改善量と、これらのばらつき、予防保全と事後保全の各単価を考慮して、次の軌道検出までの間に保守を行う (PM) か、行わない (KP) かを決定するために、数理計画技術を用いて図 3.8 に示す多段階意思決定モデルを構築した<sup>1)</sup>。数理計画モデルの構造としては、以下のように表される。

- 変数 保守の実施の有無を表す 0-1 型整数変数
- 制約条件 劣化指標の管理値
- 目的関数 今後  $n$  年間における期待総費用  $\Rightarrow$  最小化

ここでの目的関数は、次の検出までに保守を実施する / しないの各場合における、今後  $n$  年間の期待総費用であり、小さい方のアクションを採用する。この各場合の費用については、軌道狂いの将来値が確率的に分布すると考えて算出する。この際、次回検出以降の各検出時における保守実施の判断が最適に行われると仮定し、また事後保全の発生確率を考慮した事後保全費用の期待値等を考慮して、動的計画法を用いた定式化がなされている。

本モデルを用いて試算した結果、図 3.9 に示すように、事後保全費用が大きい場合には、軌道狂いが余り大きくならないうちに保守する方が経済的である等、論理的に正しい解を得られている。本モデルは、個々の箇所に対する判断を最適化するものであり、実際にはこうした箇所が線路方向に数多く存在していることから、実務で活用するには、全線での保守対象区間数等を考慮して、保守計画に落とし込む必要がある。

### (4) 軌道構造の設計の最適化

上記の (1) ~ (3) は保守の内容や時期を最適化するものであったが、数理計画技術は設計においても活用でき、例としてバラストを有する軌道構造の設計において、レール種類、継目種類、レール締結装置種類、まくらぎ種類、まくらぎ間隔、道床厚といった各項目の内容を決める問題への適用が挙げられる。例えば、レール種別として、50kgN レールや 60kg レール等が存在し、こうした候補から選択する必要がある。そこで、与えられた車両・運転条件の下、施工費用や保守周期を考慮して、各項目における選択を最適化する。数理計画モデルの構造としては、以下のように表される。

- 変数 各項目における候補材料からの選択内容を表す整数変数
- 制約条件 総予算額
- 目的関数 軌道狂い保守周期延伸量  $\Rightarrow$  最大化

この問題に対しても、上記 (3) と同様に動的計画法を用いて定式化でき、様々な組合せの中から、費用対

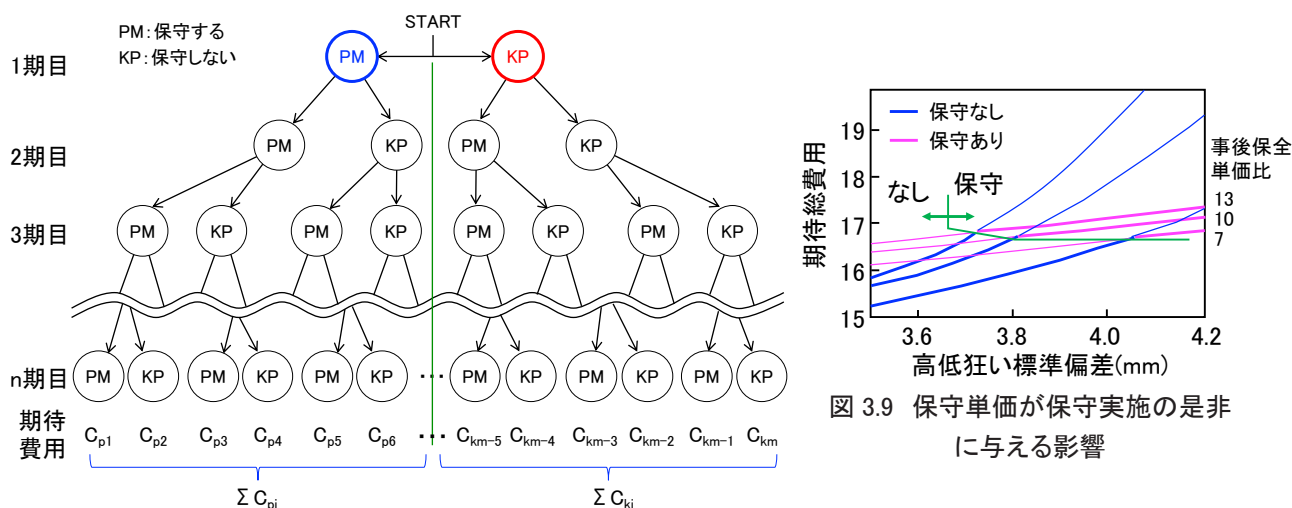


図 3.8 軌道保守の多段階決定モデル

効果が高い軌道構造を選択できる。なお、実際の設計では、レール等の各部材の破壊に対する安全性等、他にも考慮すべき要因があるため、それらを総合的に満足する構造を選択する必要がある。

以上のように、数理計画技術を軌道の維持管理業務や設計に適用した例を整理して示したが、「(1) 保守対象区間の選択」、「(2) スケジューリング」については、適用事例が多く、また実用化にも至っていることから、長大設備の維持管理において、これらを目的とした数理最適化技術の適用は有用といえる。適用にあたっては、設備が長大な分、モデルの規模が大きくなりやすいため、特にスケジューリングに適用する際、実務との整合性を損なわない範囲でモデルを複層分割する等して、解きやすくする工夫が必要である。よって、数理計画技術の適用においては、検討対象の構造や業務フローを十分に理解することが重要である。

### 3.2 適用時における課題

以上では、数理最適化技術による解決を試みた軌道の維持管理業務等の事例と適用内容を整理して示したが、全ての事例において実用化にまで到達できたわけではない。到達できなかった事例では、実務で用いるには課題があった他、実用化した事例においても、導入過程で幾つかの課題が存在した。ここでは、これらの課題を一般化して、考察する。

#### ①数理最適化技術への理解

数理最適化技術を適用したシステム等により実問題を解決する際、ユーザが数理最適化の専門家である、或いは知見を有していることは稀であり、従来の業務がコンピュータで自動化されるという認識までであるのが一般的である。また、担当者が苦勞して計画を作成していたような複雑な問題については、数理最適化技術が完全に取って代わるのは容易ではないことも多い。よって、数理最適化技術が従来の業務を完全に置き換えられるものではない可能性を開発側、ユーザ側で共有した上で、導入後のシステムと担当者との役割分担を適切に行う必要がある。こうした議論を進めるためには、数理最適化技術で得られる出力が具体的にどのようなものであるかを示すことが、効果的である。例えば、3.1 で示した図 3.2 は保守対象区間を計画モデルと担当者が選択した結果を比較したものであり、また図 3.3 は作成した保守計画を実施した結果をまとめたものである。こうした試算や試行の結果を確認しながら、システムと担当者が各々で担う範囲を明確にしていくことが重要である。

#### ②導入コストの壁

数理最適化技術を用いた保守計画システム等を開発した際に、最も頻繁に遭遇するのは導入コストの問題である。解決のためには、本体の価格低減も有効ではあるが、他の情報システムの導入や更新に合わせて計画システム等を導入することも有効である。一般に、検査システムやデータ管理システムといった情報システムは基幹システムであるため、導入や更新の優先度は高く、予算も多く準備される。基幹システムの導入・更新と合わせて計画システムも導入するとすれば、共通的な環境整備等のコストを基幹システム側で負担でき、計画システム単体で導入する場合に比べて、導入コストは下がる。また、計画システムの入力データは基幹システムから取得することが多いため、そのインターフェースの整備も同時に行える点でもコストは下がる。このような規模の経済性が発揮されるよう、基幹システムの導入や更新の時期に合わせて、計画システム等の導入を提案することは導入コストの低減に有効である。

また、コストとは別の価値観が導入を促す場合があり、その代表例が「コンプライアンス」と「DX」である。「コンプライアンス」については、軌道狂いが管理値を超過した際には保守を行うという社内ルールを遵守するための手段として計画システムを導入し、管理値到達前の予防保全を徹底することで、管理値到達の頻度を

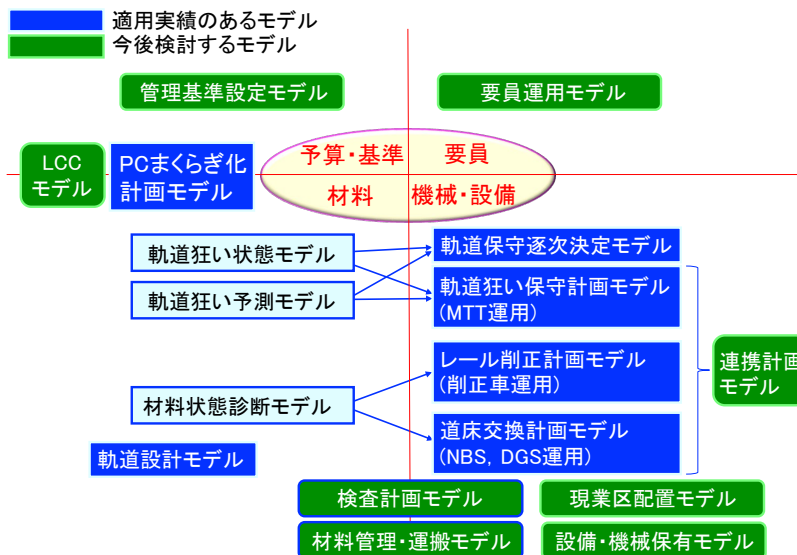


図 4.1 数理計画技術を活用した軌道保守に関するモデルの整理

できるだけ減らす他、一覧表として出力される到達見込み箇所をチェックし、計画に漏れがないことを確認できる仕組みを提供した。一方、「DX」については、近年、各事業者とも導入方法を模索している中、検査データを分析・活用して効率的な保守計画を作成できる計画システムは、DXの趣旨に合致しており、関心が高まっている。他にも「SDGs」との関係性を示す等、社会的に求められている方向性と数理計画技術の価値を合わせることも有効である。

### ③目の前の課題との優先度の差

唯一の担当者が今日、明日に辞めるわけでない限り、現在、対応できている業務については、直ちに困る心配はない。また、担当者の頑張りで何とかなっている業務も存在する。この結果、優先して対処されるのは目の前の問題であり、数理最適化技術を用いた計画システム等の導入による問題解決の優先度は低くなりがちである。更に、目の前の問題は次々と現れ、途切れないことが多い。一方で、労働力の減少や厳しい経営環境は、早晚、問題として顕在化してくるが、そこから対応を検討しては遅い可能性が高い。よって、今、目に見えない問題の重要性を共通認識とすることも数理計画技術の適用に先立って重要な場合が多い。

### ④現場の技術レベルの低下への懸念

数理最適化技術が熟練担当者に代わって業務を担うようになると、本技術（を活用したシステム）への担当者の依存度が高まり、自らが判断し、考える機会が減少して技術レベルは低下するという懸念が、特に管理者からよく示される。このため、人材育成の観点で残すべきスキルとシステムに任せる部分をどのように分けるかという議論も数理最適化技術の導入に際しては必要になることが多い。よって、先の①で述べた内容と重複するが、数理最適化技術が担う範囲の検討は、こうした観点においても重要である。

### ⑤社内ルールや業務フローの変更の手間

新しいシステムの導入においては、社内ルールや業務フローの変更が必要になる場合がある。鉄道事業者の場合、各地方運輸局に届け出ている「実施基準」の内容変更を伴う場合、運輸局との調整にリソースと時間を要する。また、社内ルールの変更時には、内容の周知や関係者への研修が必要な場合があるため、こうした手続きに要する時間や調整作業を考慮して導入のスケジュールを検討する必要がある。

## 4. 今後の軌道の維持管理業務への数理最適化技術の適用

これまで数理最適化技術を応用して構築してきたモデルについて、生産現場等で管理要素として挙げられることが多い「予算・基準」、「要員」、「機械・設備」、「材料」の観点で分類したものを図 4.1 に示す。構築したモデルの多くは、材料と機械・設備に関係しており、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、予算・基準に関するモデルは少なく、要員については実績がない。これらは、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のニーズが低かったことが理由として考えられる。

同図には以下で言及する今後の構築が想定されるモデルについても示した。軌道の維持管理業務の効率化を更に進めるという観点では、個別の業務を連携させて総合的に効率化を図る、また保守だけでなく検査も効率化の対象とする。更に予算・基準、要員に関わる部分に適用対象を拡大するといったことが、今後は課題となる可能性がある。

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管理モデルの構築の方向性をまとめる。

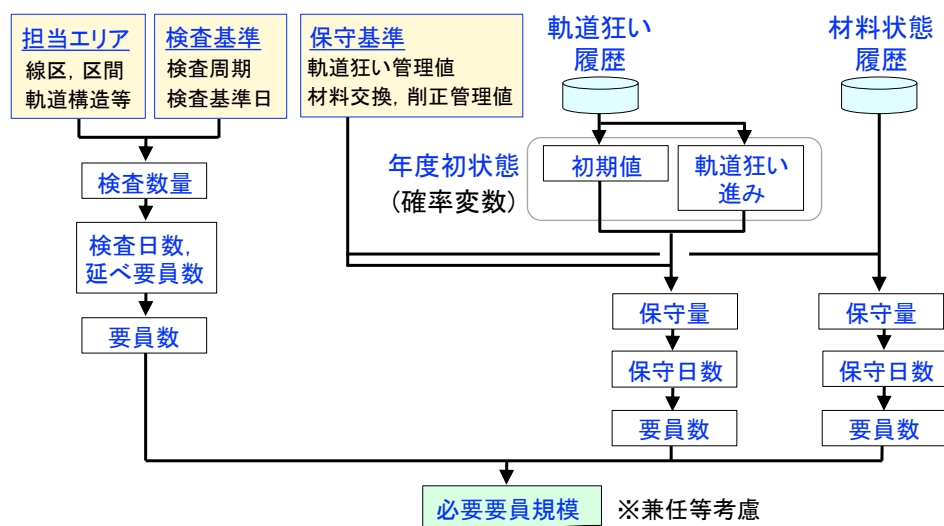


図 4.2 現業区の規模の検討モデル

#### 4.1 鉄道ネットワーク再構築への対応

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って鉄道事業者の収益は減少し、従来の鉄道ネットワークの維持が難しくなってきた結果、輸送モードの転換等により、ネットワークが再構築される可能性がある。よって、再構築後の軌道の延長や使用条件に対応した管理への移行のための検討ツールが必要になると考えられる。

##### (1) 現業区の数、配置、規模と担当範囲の適正化

維持管理を担当する現業区の数や配置、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。

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、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実状に応じて現実的に適当な数の候補を予め作成し、妥当性を評価するのがよいと考えられる。

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 4.2 のように検討できる。検査は対象ごとに検査の周期や時期が決まっているため、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により保守量を推定できる。一方、軌道狂いのような状態基準保全の適用対象では、劣化状態指標の将来推移を予測して保守量を推定できる。但し、劣化状態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である。そして、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や要員数を算定できる。

次に、現業区の配置については、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、検査・保守能力の他、異常時への対応や復旧能力を考慮する必要がある。

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検討対象になると考えられる。保守基地の集約による固定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、数理最適化技術やシミュレーションを応用して検討することが考えられる。

##### (2) 保有設備、機械類の規模・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場合には、リース料の支払いが必要である。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、これまでに構築した複数台の大型機械の運用計画モデルの活用が考えられる。本モデルを用いた MTT の保有台数の検討例を図 4.3 に示す<sup>8)</sup>。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、検討対象とする台数が更に多い場合には数理計画モデルの大規模化により、最適解の探索時間が延びると想定される他、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

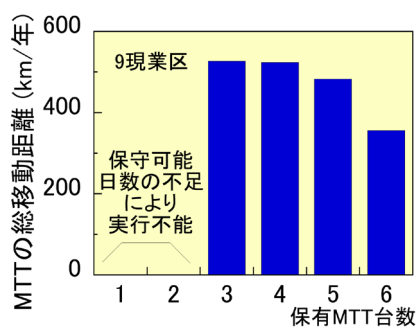


図 4.3 MTT 台数と総移動距離

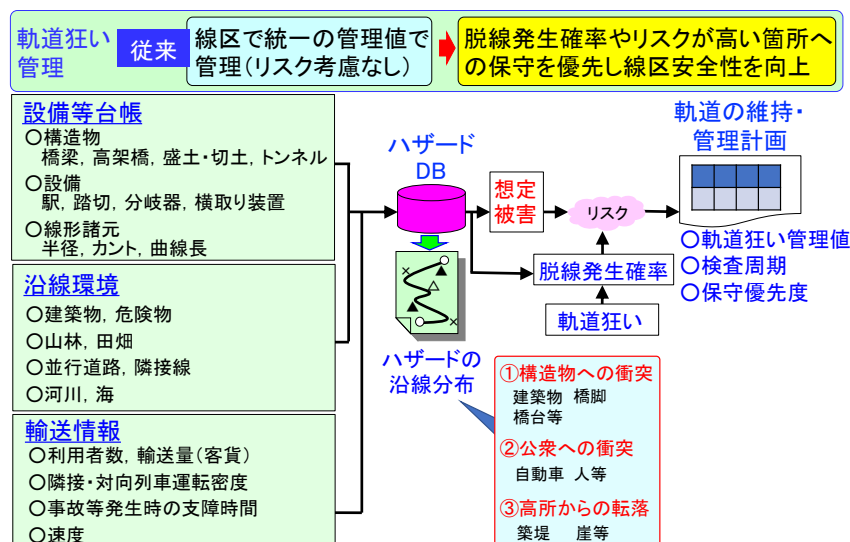


図 4.4 脱線事故リスクを考慮した軌道狂い保守の考え方

劣化速度によって必要保守量は増減するため、それらの変動（ばらつき）を考慮して台数の適正値を検討する必要がある。

よって、劣化状態指標の初期値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値を簡単に検討できるモデルの構築が必要である。

## 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、国土交通省の告示を参考に各事業者で定めているが、直線や緩曲線（半径の大きな曲線）におけるレールの側摩耗のように、劣化速度が小さく、現状が十分に健全であれば、突発的に発生する異状を巡視等によって把握できる条件の下、次の検査時期は幾らか延伸できると考えられる。よって、履歴データにより将来の推移を予測し、次の検査時期を劣化状態に応じて決めることで、検査量を適正化できると考えられる。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対して有効である。また、個々の設備、機械により検査時期が異なると管理が煩雑になるという問題があるため、検査のシステム化等を一体的に行っ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進める必要がある。

### (2) 状態評価指標の適正化

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が基本である。この管理法では、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ため、脱線の発生可能性の大小を直接的に考慮するのではなく、管理値に到達した場合には保守がなされる。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<sup>12)</sup>。よって、図4.4に示すように、事故の発生確率やリスク（発生確率×想定被害）を保守計画の作成や管理値の設定の際に考慮することで、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<sup>13)</sup>。

上記のような保守の導入法としては、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（発生確率と想定被害の積）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、先に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することで、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。更に、各箇所の想定被害の大きさに応じて管理値を設定することもできる。図4.5に軌道狂いの管理値の算出例<sup>13)</sup>を示す。想定被害が大きな箇所では、管理値を小さくする方がよいことがわかる。

一方で、現地で保守する際、従来は可搬型機器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、現地で測定した仕上がり形状から確率やリスクを簡単に算出すると共に、仕上がり不十分な場合には、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。

## 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、業務の外注化が進められている。このとき、

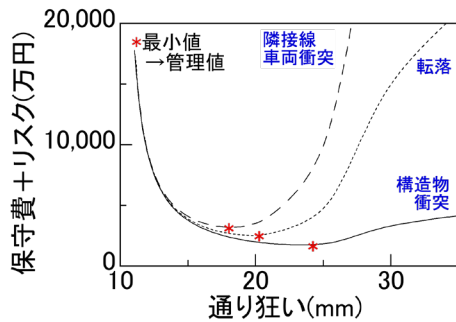


図 4.5 通り狂い管理値の検討

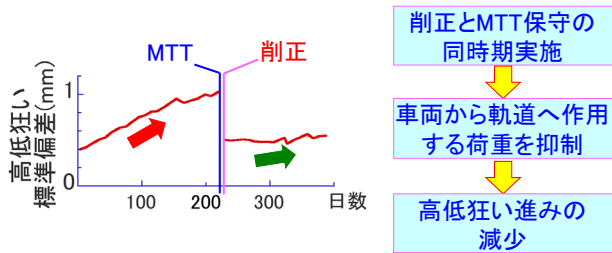


図 4.6 軌道狂い保守とレール削正同時期実施効果

ノウハウが必要な業務を外注化する場合には、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、表 3.1 に示した軌道状態診断モデルや保守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し、外注時の契約条件に本システムの利用を定め、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。こうした外注先での操作性という観点も、今後、数理最適化技術を適用する際には必要と考えられる。

## (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、視認性が悪い等、危険な作業環境下にある。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<sup>14)</sup>。

この集中修繕の区間や保守内容の選定には、先に述べた軌道状態診断モデルや PC まくらぎ化計画モデルを適用することができる。また、LCC（Life Cycle Costing）の観点に基づく改良計画の作成も必要である。よって、集中修繕の効率化に向けた数理最適化技術の活用も今後の検討対象になると考えられる。

## (3) 要員・材料運用計画の自動化

現業区の要員の運用は、4.1(1) に述べた現業区規模の適正化の他、上記の業務体制の見直し等によって、大きく変わる可能性がある。一般に、現業区では、日勤・夜勤を伴う様々な業務を行えるよう、1～2ヶ月前には勤務計画を担当者が作成してきたが、担当者の負担軽減と計画の品質向上のために、これを自動化・省力化することが考えられる。また、材料管理についても、在庫・発注・緊急時予備品管理の他、保守や工事に合わせた現地への輸送、発生品回収の計画作成等、これまで担当者の技能に依存して行われていた業務が存在する。よって、数理最適化技術の応用により、これらの効率化が進むことが期待される。

## 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 4.6 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<sup>15)</sup>。よって、MTTとレール削正車の運用を連携させた計画モデルを実用化することで、更に経済性の高い保守計画を作成できる。同様に、作業性を向上するために複数の保守作業をまとめて行うことを考慮した計画の作成にも、数理最適化技術を活用できると考えられる。

## 5. おわりに

開業して 150 年が経過した鉄道は、我が国の社会・経済活動を長く支えてきたが、労働人口や利用者の減少という問題に直面する一方、環境負荷の低い輸送手段として、また高齢化社会における持続可能なまちづくりの中で、新たな役割が求められつつある。その役割を広く果たすためには、新たな技術や管理法の導入により、ハード・ソフトの両面から鉄道事業のサステナビリティを高める取り組みを進め、導入する必要がある。数理最適化技術は、効率的で安全性の高い鉄道の実現に、これからも大きく貢献できるポテンシャルを有していることから、活用の範囲を更に拡大できるよう、研究・検討を継続していく。

### [参考文献]

- (1) 三和：Numerical Optimizer が変える線路のメンテナンス，数理システム ユーザーコンファレンス 2019，2019
- (2) 三和，大山：軌道保守計画支援システム開発の過去，現在，そして将来，日本オペレーションズ・リサーチ学会 2019 年秋季研究発表会，2019
- (3) 葛西，西藤，小松，小木曾，矢作，小西：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, 2016

- (4) 三和, 大山 : 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, 2013
- (5) 田中, 福山, 三和 : レール凹凸評価指標と削正車最適運用計画システム. 鉄道総研報告, Vol.23, No.10, 2009
- (6) 金丸, 三和, 片山 : PC まくらぎ化計画作成システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.30, No.10, 2016
- (7) 昆野 : Web 版 PC まくらぎ化計画策定ツールの開発, 鉄道総研施設研究ニュース, No.386, 2022
- (8) 三和, 矢坂, 吉田, 松本, 佐々木, 松丸 : 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, 2014
- (9) 三和, 西島, 矢坂, 松本, 山田, 大山 : 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, 2021
- (10) 三和, 木村 : 長期的な経済性を考慮した軌道保守計画を支援する, RRR, Vol.69, No.1, 2012
- (11) 三和, 内田 : 軌道状態推移モデルの設定と軌道保守施策決定法, 鉄道総研報告, Vol.11, No.2, 1997
- (12) 内田, 高井, 村松, 石田 : 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, 2001
- (13) 清水, 三和 : 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, 2019
- (14) 細馬, 難波, 東條 : 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, 2022
- (15) 松本, 三和, 吉田, 矢坂, 桶谷, 原田 : 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, 2016