

鉄道分野における OR 手法の活用事例

加藤 怜, 三和 雅史

鉄道は、安全、安定性が高く、大量輸送を実現するエネルギー効率の高い公共交通機関である。しかし、近年の自然災害の激甚化、急激な少子高齢化などの懸念事項も多く、持続的発展のためには多方面での取り組みが欠かせない。一方で、OR はこれまで鉄道分野のさまざまな課題に対し、問題解決のツールとして活用されてきた。今後本格化する労働力不足を踏まえると、人に依存する従来の考え方からの脱却が必要であり、そのために OR を活用できる場面がますます増えると期待される。本稿では、鉄道における OR 手法の活用事例の紹介を目的として、運輸部門および軌道部門の取り組みを紹介する。

キーワード：鉄道、列車ダイヤ、運転整理、ネットワークフロー、軌道保守計画、軌道構造改良、整数計画モデル

1. はじめに

鉄道は、安全、安定性が高く、大量輸送を実現するエネルギー効率の高い公共交通機関である。しかし、近年の自然災害の激甚化、急激な少子高齢化などの懸念事項も多く、持続的発展のためには多方面での取り組みが欠かせない。そのようななかで、OR 手法はこれまで鉄道分野のさまざまな課題に対し、問題解決のツールとして活用されてきた。

本稿では、鉄道への OR 手法の活用事例を広く紹介することを目的とし、数多ある事例の中から、運輸部門および軌道部門の研究内容を紹介する。以下、2 節で運輸部門における事例、3 節で軌道部門における事例を紹介する。前者では、どのように OR 手法を適用するかという観点で、特定の問題に対するモデル化の詳細を述べる。一方、後者では、どのように実業務に展開するかという観点で、実用システムの内容を中心に述べる。

2. 運輸部門における活用事例

鉄道の運輸部門における OR 手法の活用例は多く、需要予測、列車ダイヤ作成・評価、車両・乗務員運用計画作成、旅客流動分析、省エネルギー運転など多岐にわたっている。

特に最近では、ダイヤ乱れ時における運転整理に関する研究課題に対し、OR 手法を活用する取り組みが

活発である。本節ではこの運転整理に着目する。

2.1 運転整理への OR 手法の活用

運転整理とは、ダイヤ乱れ時において、あらかじめ決められている列車ダイヤや車両運用計画（各編成車両の使用スケジュールのこと）に変更を加えることを指す [1]。列車ダイヤが乱れた際には、指令室にいる指令員が、リアルタイムに変更内容を検討し、関係各所への指示・手配を実施することで、早期のダイヤ回復を図っている。しかし、運転整理業務は現状でも指令員の手腕に依存している部分が多いため、ダイヤ回復まで長時間を要し、旅客に不便を強いることも少なくない。そこで、指令員の負担を軽減する研究開発が盛んであり、なかでも、運転整理を自動的に実施するため、運転整理案を OR 手法により作成する研究開発が欧州を中心に多数実施されており [2]、日本国内でもいくつかの研究事例がある（たとえば文献 [3, 4] など）。

本稿では、運転整理における OR 手法活用の一例として、速度規制時の運転整理 [5] を取り上げる。

2.2 速度規制時の運転整理

近年、大雨や強風が原因となり、列車ダイヤが乱れる事象が増加している。鉄道沿線には雨量計や風速計といった計器類が設置されており、あらかじめ定めた制限値に達した場合には、安全性を確保するため、列車の速度を制限する、運転を取り止めるといった対処が必要となる。

このなかで、列車の速度が制限された状況に着目する。列車は規制区間を走行すると遅延が生じ、規制区間、規制時間が長くなると、大規模なダイヤ乱れを引き起こすことがある。

図 1 および図 2 には、計画ダイヤ（あらかじめ決められているダイヤ）の例と、このダイヤに対し、駅 B～

かとう さとし
公益財団法人鉄道総合技術研究所信号・情報技術研究部
〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38
kato.satoshi.58@rtri.or.jp
みわ まさし
公益財団法人鉄道総合技術研究所軌道技術研究部

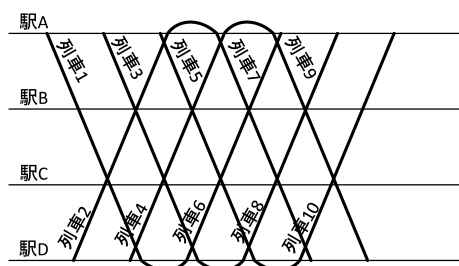


図 1 計画ダイヤの例

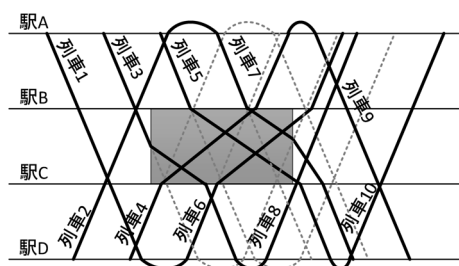


図 2 速度規制時のダイヤ

駅 C の区間に速度規制が生じたときのダイヤ図を示す。図中の灰色の四角で囲った部分が規制区間および規制時間を意味しており、規制区間を通過する列車 3～7 は、線の傾きが小さくなっている。つまり、駅間の走行時間が長くなり、遅延が発生している状況を表す。この遅延は折返し列車にも波及し、列車 8～10 は折返し時点で遅延を回復できず、始発時点で遅延が生じている。

2.3 速度規制時の運転整理で求められること

速度規制時の運転整理案の作成にあたり、実際の指令員にヒアリング調査を実施したところ、特に以下の項目を重視する必要があることがわかった。

- ・ 旅客需要に応じた輸送力を確保する
- ・ 車両運用計画を考慮する
- ・ 変更数をなるべく少なくする

速度規制により走行時間が増加すると、ある時間幅に対して計画どおりの列車本数を確保するためには、一時的に多くの車両編成数が必要となる。そのため、運休が避けられないことがある。しかし、運休は輸送力の低下をもたらすため、必要な輸送力を考慮したうえで、運休は必要最小限にとどめるほうがよい。また、各車両編成の運用の変更は比較的自由に実施できるものの、当日の最終目的地（入区箇所）は、翌日の運用を考慮し、なるべく計画で決められている箇所に戻すことが望ましい（これを「運用戻し」という）。さらに、運休や車両運用変更などの何かしらの変更が生じると、関係箇所への手配、伝達が必要となり、むやみな変更

は手配ミスリスクを生むため、変更数は少ないほうが望ましい。

本稿では、速度規制の情報（いつからいつまで、どの区間に速度規制が生じるか）が与えられたときに、上記の要件を考慮した運転整理案の作成を目的とする。

2.4 多品種ネットワークフローによるモデル化

運転整理案作成は、大きく分けて、運休や車両運用の変更などの変更内容の決定、その変更を実施したときの各列車の時刻の決定、の二つの要素を含むが、提案手法は以下のような構成とした [6]。

- (1) 速度規制の情報から、規制による遅延を反映したダイヤ（予測ダイヤと呼ぶ）を作成する
- (2) 予測ダイヤの情報から、運休および車両運用変更の変更内容を決定する
- (3) 変更内容の情報に基づき、予測ダイヤを再作成する（(1)の予測ダイヤを修正する）

上記手順で、(3) で最終的に作成した予測ダイヤを提案する運転整理案とする。まず、(1)、(3) の予測ダイヤ作成については、整数変数を含まない単純な数理計画問題としてモデル化可能なので、本稿では割愛する（詳細は文献 [7] を参照されたい）。

(2) の変更内容の決定のために、この問題を多品種ネットワークフローとしてモデル化する。車両編成を品種、車両運用をフローと見なすことで、列車運行をモデル化することができる。以下では、ネットワークの詳細を述べる。

予測ダイヤの情報をもとに（例を図 3 に示す）、図 4 に示すようなネットワークを作成する。白抜きノードは予測ダイヤの各列車、各駅の到着および出発を表し、黒丸は出区（各編成車両のその日の最初の地点）を、黒三角は入区を意味する。アークはノード間で推移が可能であることを意味するが、各アークのコストは、計画運用に合致する場合は 0、それ以外の場合は 1 を付与することで、計画運用からの変更数をなるべく少なくすることが可能となる。

また、現在時刻の各車両編成の現在位置を取得し、そこを出区箇所とみなして当該白抜きノードへ黒丸からアークを張る。さらに、各編成車両の計画運用における入区箇所において、黒三角に向けてアークを張る。

以上のネットワークにより、駅の番線数、駅からの出発、到着のルートなども考慮することが可能になる。また、各車両編成は計画運用上の入区箇所で終了することが保証され、運用戻しが考慮可能となる。

図 4 では、たとえば左上の二つの白抜きノードは、それぞれ列車 1 の駅 A 出発を意味し、右下へ張られ

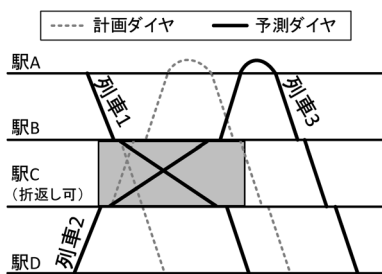


図3 予測ダイヤの作成

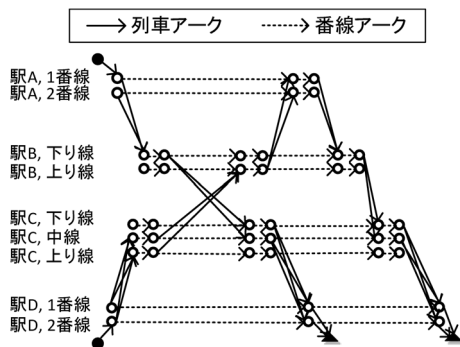


図4 図3のダイヤに対応するネットワーク

ている列車アーキは列車1の各番線からの駅A～駅B間走行を意味する。駅Aは終端駅で、1番線、2番線の二つの番線があり、それぞれから駅B方面に出発可能であることを想定している。

このネットワーク上での多品種ネットワークフロー問題としてモデル化することで、解として得られるフロー、すなわち車両運用から、変更内容（運休および車両運用変更）を抽出する。

以上のモデルについて、混合整数計画問題として定式化する。表1に、使用する記号の定義を示す。なお、「デマンド分布」とは、時間幅、区間、方面の組合せを意味し、各デマンド分布の需要量は所与と仮定する。このデータは、鉄道の運輸に関する研究開発でよく用いられるOD(Origin-Destination)データを集約することによって得られる。

定式化は以下のとおりである。

$$\text{Min. } \alpha \sum_{k \in K} \sum_{e \in E} c_e^k x_e^k + \beta \sum_{m \in M} y_m \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{e \in \gamma^+(v)} x_e^k - \sum_{e \in \gamma^-(v)} x_e^k = n_v^k, \quad \forall k \in K, \forall v \in V \quad (2)$$

表1 記号の定義

記号	意味
K	車両編成 k の集合
V	ネットワーク上のノード v の集合
E	ネットワーク上のアーク e の集合
$\gamma^+(v)$	ノード v から出るアーク e の集合
$\gamma^-(v)$	ノード v に入るアーク e の集合
M	デマンド分布 m の集合
E_m	デマンド分布 m に含まれる（方向が一致する）アーク e の集合
n_v^k	車両編成 k におけるノード v のフロー整合数（出区なら1、入区なら-1、それ以外なら0）
u_e	アーク e の容量上限
p^k	車両編成 k の輸送力（輸送人員）
d_m	デマンド分布 m の需要量
c_e^k	車両編成 k がアーク e を流れることによるコスト（計画運用ならば0、それ以外ならば1）
x_e^k	車両編成 k がアーク e を流れるのであれば1、さもなければ0を表す変数
y_m	デマンド分布 m における需要量に対し不足する輸送力を表す変数

$$\sum_{k \in K} x_e^k \leq u_e, \quad \forall e \in E \quad (3)$$

$$y_m \geq d_m - \sum_{k \in K} \sum_{e \in E_m} p^k x_e^k, \quad \forall m \in M \quad (4)$$

$$x_e^k \in \{0, 1\}, \quad \forall e \in E, \forall k \in K \quad (5)$$

$$y_m \geq 0, \quad \forall m \in M \quad (6)$$

(1) 式は目的関数であり、第1項は車両運用変更のコスト、第2項は需要量に対する輸送力のペナルティを示す。 α および β はそれぞれのコストに対する重みであり、状況に応じて設定する。

(2)～(6) 式は制約条件である。(2) 式はネットワークフローにおける流量保存式であるが、これは、編成車両数が途中で増加、減少しないことを意味する。(3) 式は、各アークの容量上限制約である。(4) 式は、各デマンド分布で必要な輸送力を確保するための条件式である。輸送力が不足する場合は y_m が正の値をとり、目的関数でペナルティとして考慮される。この問題は、一般的な多品種ネットワークフロー問題に付加的な条件が付与された問題とみなすことができる。

2.5 ケーススタディ

2.5.1 検証方法

提案手法の妥当性を評価するために、実在路線および実際に発生した速度規制事例を対象に適用する。対象路線は、1日当たりの列車本数は202本と中規模路線であるが、年間を通して大雨による速度規制の頻度

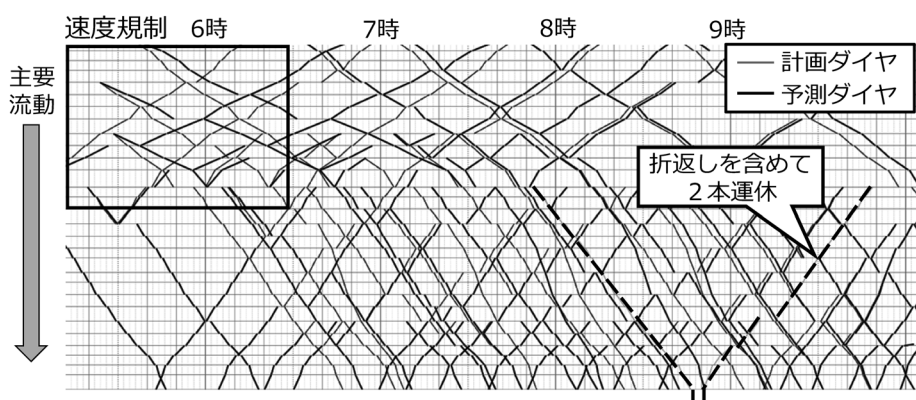


図5 事例1の提案結果

が高い路線を選定した。

対象とする事例は以下の二つである。

事例1 規制発生時刻：始発以前～6:24

規制影響列車数：12

事例2 規制発生時刻：20:26～23:24

規制影響列車数：17

規制影響列車数とは、計画ダイヤ上で速度規制の影響を受ける（規制により遅延が生じる）列車数を表し、この値が大きいほど速度規制の影響が大きいと想定される。なお、事例1, 2のいずれも大雨を原因とした速度規制であり、また実際に運休が生じた事例である。

計算には、Windows 10 Professional, CPU Core i7-8700 K(3.7 GHz), メモリ 64 GB の計算機を使用し、最適化ソルバーとして Gurobi Optimizer 7.5 を使用した。

2.5.2 結果と考察

提案手法の評価は、作成した運転整理案の妥当性、計算時間の二つの観点で行う。表2に、各事例の運休本数、車両運用変更数、計算時間（秒）を示す。

事例1では、運休が2本、車両運用変更数が3つの運転整理案が作成されたが、その予測ダイヤを図5に示す。この路線は、ダイヤ図の下部がこの地域の中心部であり、朝ラッシュ時は下方面が主要流動となる。ダイヤ図上の点線が運休列車を意味するが、折返しを含む列車2本が運休となっている。このような折返しを含む2本の組み合わせでの運休は、実際の運転整理でも非常によく用いられるが、そのような方法が提案されたのは、モデルの車両運用に関する部分が機能したためと思われる。なお、速度規制が生じた時間帯が早朝であるにもかかわらず、8時頃まで運休を出さないのは、朝ラッシュの最混雑時間帯の輸送力確保を優先したからと想定される。以上より、実用的な案が作

表2 運転整理手法の計算性能

事例	運休本数	車両運用変更数	計算時間（秒）
1	2	3	17.84
2	0	0	30.67

成されたといえる。

一方、事例2では、運休や車両運用変更は提案されていない。これは、規制開始時刻が20時以降であるため、運用戻しのことを考慮すると、終電まで変更なしとすることが望ましいと判断されたと考えられる。

計算時間はいずれも30秒程度であり、実用的にも許容範囲内と思われる。しかし、列車本数がさらに多い路線など、他路線での検証は必要である。

2.6 実用化に向けて

本節では、運転整理に関する研究開発の一つとして、速度規制時の運転整理を取り上げた。しかし、本内容に限らず、運転整理研究の実用化は非常にハードルが高い。これは、適用先が運行管理装置という、鉄道システムのなかでも極めて高安全性が要求されるものであることに起因する。それでも、今後見込まれる労働力不足に対応するためにも、運転整理の高度化のニーズは高まると予想しており、実用化に向けた研究開発を継続していきたい。そこでは、ORは課題解決のツールとして非常に有効と考えており、適用できる場面はますます増えることだろう。

3. 鉄道線路（軌道）部門における活用事例

安全で快適な列車運行のために、レール、まくらぎ、道床（砂利）などの材料の状態や列車の繰返し通過により成長する軌道面の不整（軌道狂い、軌道変位）の検査が行われ、保守が実施される。軌道は、その延長が何kmにも及ぶため、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大きな課題である。すなわち、軌道の検査や保守には、技能に依存した業務が多く残っており、これを普遍化できる OR の活用対象が豊富で幅広く存在する。

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支援システムが開発され、実用化されている。以下にシステムの概要を紹介する。

3.1 計画支援システムの開発

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・イエローは軌道など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。たとえば、軌道狂いについては、図 6 に示す各項目を対象に管理が行われており、検査車両では軌道狂いは 0.25~1 m ピッチで測定（検測）されるなど、取得データの量は大変多い。近年では図 7 に示すような営業車による高頻度検測が実用化され、取得されるデータ量はさら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多い。また、材料種別ごとの管理が基本であり、状態診断や保守計画作成は、担当者の経験などに依存している。

以上のような各検査データは、検査対象の状態評価や保守実施の判断に使われるが、データによっては他材料の状態を表す情報が含まれている。また、車両、運転、輸送などの各分野でさまざまなデータが取得できるようになっている。よって、データの横断的な活用により、軌道保守の品質はさらに向上できる可能性がある。

3.2 計画支援システムの開発

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、箇所適切な計画を作成することが重要である。すなわち、「将来の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の保守」の実現が必要である。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支援システムである。開発の過程を図 8 に示す。

この開発においては、「検査データの活用」という観点とあわせて重要なのが、「保守用車（機械）運用の最適化」である。軌道保守では、作業の機械化が進み、各種保守には、図 9 に示す専用の保守用車が用いられて

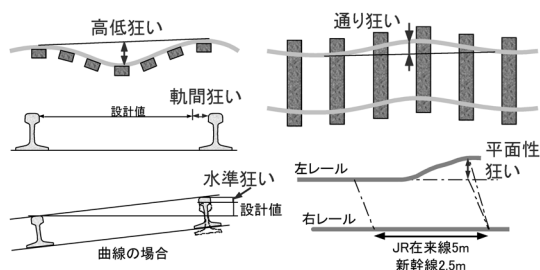


図 6 軌道狂いの管理項目



図 7 営業車に設置された軌道検測装置

いる。このため、保守計画の作成では、保守用車運用を考慮することが重要である。

3.2.1 軌道狂い保守計画システム

従来、軌道狂い管理では、直近の検測値と管理値を照合し、検測値のほう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が積極的には行われないなど、データの活用は十分ではなかった。そこで、軌道狂いデータを分析し、推移予測モデルを構築した [8]。構築に際しては、統計分析結果や時系列データの平滑化法などを活用した。

次に、大きくなった軌道狂いに対しては、図 9 に示す機械（MTT：マルチプルタイタンパ）による保守が多く、多くの鉄道会社で行われている。この MTT は、線路上を移動して保守箇所の軌道狂いを整正するが、高価なため、一定エリアに 1 台ずつしか配備されないほか、回送可能範囲などの制約がある。そこで、MTT を効率的に運用する、保守スケジュールの作成モデルを構築した [8]。

一般に、MTT 保守は数 100 m 単位で連続的に行われるため、各箇所の軌道狂いに基づき保守区間を切り出す必要がある。そこで、ナップサック問題を応用した保守箇所選択モデルと、選択した区間に保守時期を付与するスケジューリングモデルを構築した。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」コスト最小化も適用可能とした。

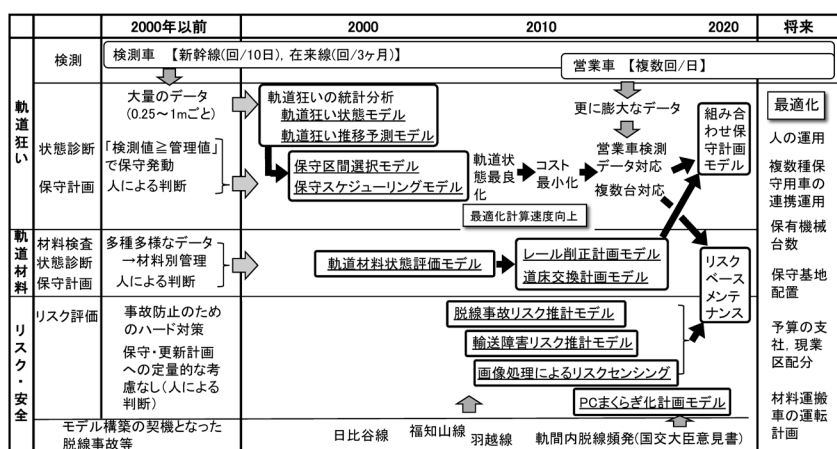


図8 軌道保守計画支援システムの開発の過程



図9 軌道保守に用いられる主要な機械

一方、本スケジューリング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、多くの線区で短時間で最適解や十分な精度の実行可能解を得られるようになった。この結果、2000年代にシステム化後、JR 5社に導入され、現場の担当者は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10に示す。X年度に導入された後、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、導入前は下り線のほう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。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。

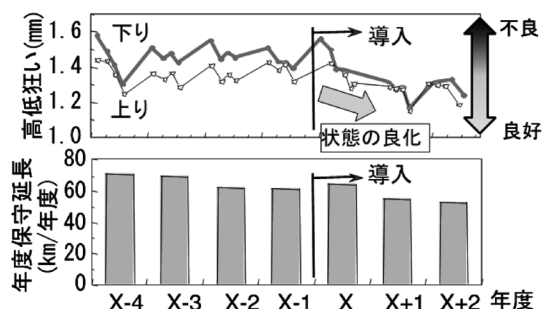


図10 軌道狂い保守計画システムの導入前後の軌道状態

ところで、本システムは、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、複数台のMTTを複数の保守現業区(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モデルにも発展させた[9]。図11は本モデルの構造であり、全MTTを効率的に運用した保守計画を作成できる。

3.2.2 材料保守計画システム(レール削正、道床交換など)

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、検査データなどからレールや道床の状態不良箇所を選択し、保守の工種やスケジュールを提案・出力する軌道状態評価システムを開発した。

まず、レール凹凸は騒音や振動の原因となるため、図9に示した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[9]。

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	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 保守費用 最小化	MTTの 保線区、基 地設備計画 軌道狂い保 守計画
	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 械の 稼働 可能 範囲	凹凸、通トン 保守期限		削正車の 保線区、基 地設備計画 削正計画
	通トン 環境				
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 保線区設備 計画 交換計画
DGS	道床不良		全作業割り 付け		

図 11 各軌道保守用車の運用を考慮した保守計画モデルの構造

また、道床が劣化すると、適切な軌道形状を維持できなくなるために、交換が必要となり、作業には図 9 に示した道床交換機 [NBS]、道床安定作業車 [DGS] が用いられる。NBS は古道床を撤去して新道床を敷設し、DGS は道床交換後に軌道に振動を与えて道床を安定化させる車両である。これらも複数の保線区で共用され、広範囲に運用して保守に用いられるため、その運用計画を作成する数理計画モデルを構築し、システム化した [9]。

各モデルの構造と適用例を図 11 に示す。実線区データに適用した結果、実績に比べて十分に良好な計画を作成できた。

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、軌道狂い保守の周期を延伸できる。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開発してきたが、今後、MTT とレール削正車の運用を連携させた組合せ保守計画の作成システムを開発することで、さらに効果的な保守計画を作成できる。

3.2.3 リスクや安全性を考慮した軌道保守計画モデル

軌道管理の目的の一つは安全性の維持、すなわ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。図 8 に示した脱線事故の一部は、脱線後の車両挙動により大事故に至った例である。これらを機として、従来の「検測値と管理値の照合」だけでなく、事故リスクが高い箇所の保守優先度を高める「リスクを考慮した保守」が必要と考えられた。そこで、わが国の事

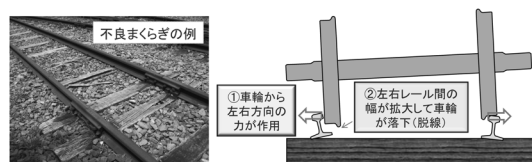


図 12 木まくらぎの状態不良と軌間内脱線

故・輸送障害の実態に応じたリスク推計モデルを構築し、リスクを考慮した軌道狂い保守計画を作成可能とした [10]。この際、沿線の被害拡大要因を把握するため、画像処理技術を活用したセンシングシステムも開発した。

また、木まくらぎの軌道では、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（図 12 に示すように、輪軸が左右レール間に落下する脱線）が毎年発生しており、2018 年には運輸安全委員会から国交相宛に意見書が出された。対策として PC（コンクリート）まくらぎ化があるが、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。そこで、この優先度を対象線区内の曲線別に算定して PC まくらぎ化する曲線を選択する数理計画モデルを構築し、システム化した [11]。

本モデルでは、図 13 に示すように 4 項目の安全性を曲線別に評価し、PC まくらぎ化する曲線の優先度を算定する。そして、施工する曲線の総延長や予算の上限制約下で効果が最大の曲線群を整数計画モデルにより選ぶ。全線が 15 km で半径 (R) 300～1600 m の 16 曲線を有する線区データに本モデルを適用して PC

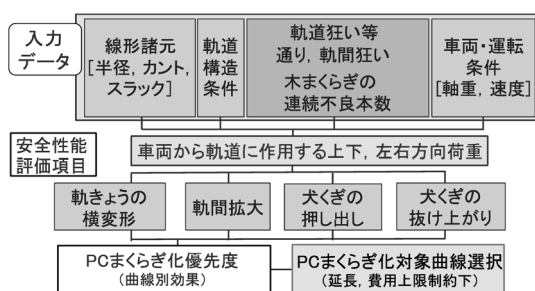


図 13 PC まくらぎ化計画モデル

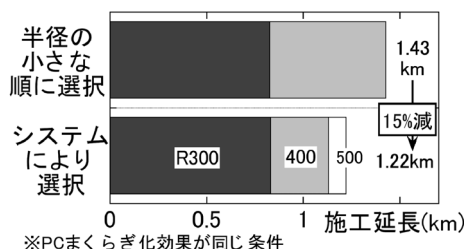


図 14 PC まくらぎ化対象曲線の選択結果

まくらぎ化曲線を選択した結果を図 14 に示す。本モデルにより対象曲線を選択した場合、脱線への余裕が定性的に小さいと考えられることが多い半径の小さな曲線から順に選択した場合に比べて、同じだけの安全性向上効果を約 15% 短い延長で達成できた。

本システムは地域鉄道を中心に活用されている。

3.3 計画支援システムのこれから

最近の鉄道では、無人運転やバッテリー搭載など、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、当面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、OR はその解決のための頼もしいパートナーである。

ところで、本節で紹介した計画支援システムには（株）NTT データ数理システム社製の Numerical Optimizer が最適化エンジンとして使われている。開発当初からの同社の協力に深く感謝する。

4. おわりに

本稿では、鉄道における OR 手法の適用事例として、運輸部門および軌道部門の研究開発内容を紹介した。

鉄道には、本稿で紹介した運輸、軌道以外にもさま

ざまな技術分野が存在する。いずれにも共通することとして、これまでは熟練者の技能に多くを委ねてきたが、今後の労働力不足へ対応するためにも、人に依存する従来の考え方からの脱却が必要ということである。たとえば、人、機械、予算、設備の配置・配分・規模の最適化などの課題が山積しており、その解決手段として、OR は強力なツールとして大いに可能性を秘めており、今後、活用できる場面がますます増えることが期待される。

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] 電気学会・鉄道における運行計画・運行管理業務高度化に関する調査専門委員会（編），『鉄道ダイヤ回復の技術』，オーム社，2010。
- [2] V. Cacchiani, D. Huisman, M. Kidd, L. Kroon, P. Toth, L. Veelenturf and J. Wagenaar, “An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling,” *Transportation Research Part B: Methodological*, **63**, pp.15–37, 2014.
- [3] 佐藤圭介，“旅客が被る不便の増分を最小化する運転整理の定式化。”オペレーションズ・リサーチ：経営の科学，**60**(10)，pp.622–629, 2015。
- [4] 今田京介，富井規雄，“途中折り返し運転を考慮した混合整数計画法による運転整理アルゴリズム，”電気学会論文誌 D，**137**，pp.484–491, 2017。
- [5] S. Kato and C. Hirai, “Simulation-based train rescheduling algorithm for supporting decision-making in temporal speed restricted situations,” In *Proceedings of the 7th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (RailLille2017)*, pp. 373–388, 2017。
- [6] 加藤怜，坂口隆，佐藤圭介，“速度規制時の車両運用変更提案手法，”鉄道総研報告，**32**(12)，pp. 5–10, 2018。
- [7] 加藤怜，佐藤圭介，坂口隆，“数理最適化による速度規制時の予測ダイヤ作成手法，”電気学会産業応用部門大会，講演番号 5-46, 2017。
- [8] T. Oyama and M. Miwa, “Mathematical modeling analyses for obtaining an optimal railway track maintenance schedule,” *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, **23**, article 207, 2006。
- [9] 三和雅史，松本麻美，矢坂健太，津田晃弘，“軌道保守用車の運用を効率化する，”RRR，**74**(11)，pp. 12–15, 2017。
- [10] M. Miwa and T. Oyama, “An optimal track maintenance scheduling model analysis taking the risk of accidents into consideration,” *International Transactions in Operational Research*, **25**，pp. 1465–1490, 2017。
- [11] 金丸清威，三和雅史，片山雄一朗，“PC まくらぎ化計画作成システムの開発，”鉄道総研報告，**30**(10)，pp.47–52, 2016。