

鉄道における数理最適化技術適用の現状と今後の展望

土屋 隆司*

Application of Mathematical Optimization Technologies to Railways - Recent Trends and Future Prospects -

Ryuji TSUCHIYA

This paper describes some of the topics from the recent research and development on the application of mathematical optimization technologies to railway operations, which include transportation planning, crew scheduling, maintenance staff scheduling, sensor network deployment plan, etc. We also discuss the future prospects of mathematical optimization technologies in railway applications, taking into consideration the rapid progress in computer technologies including parallel processing and cloud computing.

キーワード：最適化，輸送計画，保守計画，数理計画法，ヒューリスティック探索，並列計算

1. はじめに

鉄道運営においては、列車運行、旅客サービス、設備保守などを含む、多様な業務の中で日々、様々な意思決定が行なわれている。これらの意思決定を的確に支援することは鉄道経営の効率化、鉄道の競争力の維持・向上にとって極めて重要である。特に、近年、対抗輸送機関との競争の激化、地球環境問題への対応の必要性等、鉄道をとりまく経営環境が益々厳しくなる中、さまざまな制約や評価指標を考慮して、最適な意思決定を行なうことが求められている。

一般に、与えられた制約条件の下で、何らかの評価指標（目的関数）を最大化もしくは最小化することを最適化と言う。実際、「生産計画の最適化」、「施設配置の最適化」、「配送計画の最適化」、など、与えられた条件を満たしつつ、効率、コスト、収益、利便性などをできるだけ高くしたいという状況は頻繁にある。「最適化」という言葉をより広く捉えて、ハードウェア、ソフトウェア、サービスなどを最適状態に近付ける（＝改善する）活動全般を指す場合も多いが、ここでは、数理的なモデリング手法・数学的な解法アルゴリズム等を用いた最適化（以下、数理最適化と呼ぶ）に限定して議論する。数理最適化を行なうための手法としては、数理計画法のように厳密な最適解を求めることに主眼を置くものから、経験則に基づく解探索（ヒューリスティック探索）により、準最適解の発見を目指すものまで、様々な手法が知られている。今日では、最適化技術自体の発展に加え、各種計算機デバイスの性能向上、マルチコア PC の普及や大規

模並列処理技術の進歩などにより、従来は多大な計算時間を要した問題が、実用的な時間で解けるようになりつつある。

本稿では、最適化技術を巡るこれらのニーズとシーズを視野に入れつつ、鉄道分野における最適化技術適用の動向について鉄道総研での取り組みを中心に紹介する。合わせて数理最適化技術の鉄道での今後の活用可能性について展望する。

2. 輸送計画・旅客サービス分野への最適化技術の適用

鉄道において数理最適化技術が適用可能である分野は潜在的には極めて広い。極論すれば、鉄道事業におけるあらゆる意思決定場面において最適化技術の適用可能性があるとと言ってもよい。しかし、これまでは、数理最適化技術の適用分野としては、輸送計画、保守計画等の計画作成問題（スケジューリング問題）が中心であった。そこで以下では、まず、これまで鉄道総研で実施してきた、最適化技術を用いた各種輸送計画業務の効率化、リソース配分の適正化、旅客利便性の向上等のための研究について紹介する。

(1) 車両運用整理への応用

機関車運用整理案作成アルゴリズムの研究では、ダイヤ乱れ時に、機関車の検査周期などを考慮し全体のスケジュール変更を行う機関車運用整理問題を整数計画問題として定式化し、列生成法により解を求める手法を提案している¹⁾。実事例を元にした計算機実験の結果、良質な解が許容時間内に得られることを確認した。さらに、本研究を発展させ、旅客列車を対象に、旅客鉄道固有の

* 輸送情報技術研究部 部長

特集：輸送情報技術

要件も考慮したダイヤ乱れ時の車両運用整理アルゴリズムを開発した。同アルゴリズムを組み込んだプロトタイプシステムによる評価試験の結果、本アルゴリズムにより妥当な運用整理案が許容時間内（1分以内程度）で得られることを確認した。本研究の詳細については、本号掲載の文献2を参照されたい。

(2) 乗務員基地配置計画への応用

乗務員基地配置駅決定アルゴリズムの研究³⁾では、基地配置駅の全面的な見直し検討を行うために、数理最適化技術を用いて、基地配置駅の決定と乗務員運用計画の作成を同時に実現するアルゴリズムを開発した。具体的には、図1に示すように、区所配置候補駅と乗務列車をノード（点）で表現した上で、区所配置候補駅ノードを始点とし、いくつかの乗務列車ノードを経由して始点まで戻るサイクルを複数構成することを考える。このとき、すべての乗務列車がいずれかのサイクルに含まれる（すなわち、すべての列車に乗務員が割り当てられる）ことを保証する必要があるのは言うまでもないが、同時に

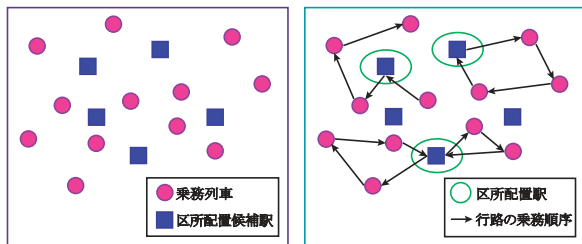


図1 乗務員区所配置問題

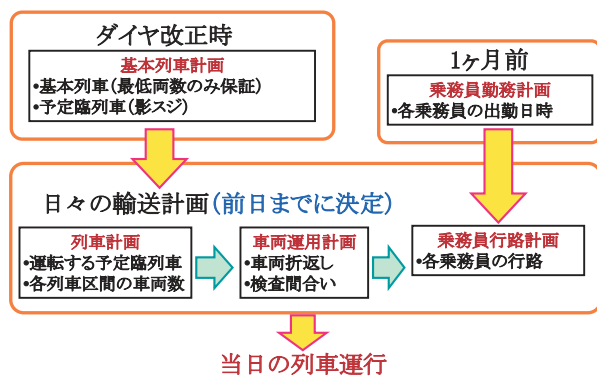


図2 日別需要に基づく輸送計画作成手法

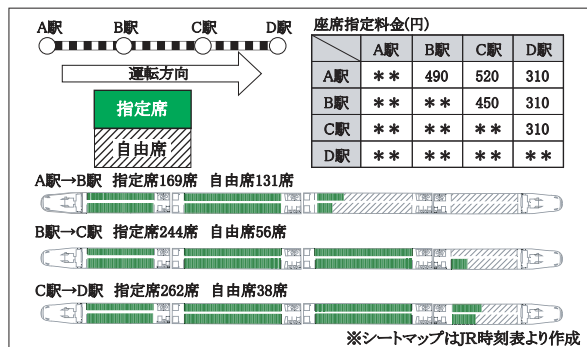


図3 柔軟な指定席・自由席配分例

労働条件等に関わる種々の制約条件を満たす必要もある。最適化指標としては、区所配置駅数、必要な乗務員数等の複数の項目の重み付き線形和を用いている。このモデルに基づいて区所配置問題を数理計画問題として定式化し、列生成法により解を求める手法を開発した。この手法により、基地配置駅と乗務員運用計画の関係について、様々な検討を行うことが可能となった。

(3) デマンド輸送への応用

日別需要に基づく輸送計画作成手法の研究⁴⁾では、個々の利用者のニーズに即応し、オンデマンドで列車設定を行うための手法について検討した(図2)。具体的には、直近の利用者数が精度良く予測可能になることを前提とした上で、推定される利用者数に対応した輸送力の提供と、車両・乗務員リソースの効率的な使用とを両立させる鉄道輸送計画の作成方法を提案した。列車計画については、各駅の滞泊車両数や入出車両数などの制約条件のもとで、OD別の想定需要に基づいて発生する旅客の総待ち時間や列車本数等を総合的に最小化する列車計画(ダイヤ編成)問題をネットワークフロー問題として定式化し、数理計画法により解くアルゴリズムを開発した。車両運用計画については、上記アルゴリズムで得られた結果に対して分割・併合回数の発生回数などが最小化するように、各車両の折り返し候補の中から最適な組み合わせを求める問題を、上記と同様にネットワークフロー問題として定式化し、その解法アルゴリズムを開発した。乗務員運用計画については、乗務員シフト作成(半月~1月前)と乗務員の行路作成(前日)とに問題を分割するアプローチを採用した。後者の行路作成については、集合被覆問題としてモデル化し、列生成法により解を得る手法を開発した。実在線区をもとに作成した試験データを用いた評価試験を行った結果、旅客の利便性とリソースの効率的な使用の両面で有効である可能性を確認した。

(4) 指定席・自由席の最適配分計画

デマンド推定に基づく柔軟な自由席・指定席配分手法に関する研究⁵⁾においては、特急料金を変化させてデマンドをコントロールするとともに、変化させた特急料金の下での席種別デマンドを推定し、推定デマンドのOD構造に対して指定席・自由席の設定数を柔軟に変化させる手法を開発した(図3)。具体的には、指定席の平均ロードファクター(座席利用率)を最大化する最適化問題として定式化し、これをヒューリスティック探索のひとつである遺伝的アルゴリズムを用いて解くアルゴリズムを開発した。開発したアルゴリズムを組み込んだ席種設定シミュレーションシステムによる評価の結果、ロードファクタの改善による鉄道事業者の収益性の向上と予約謝絶の回避等、提案する柔軟な席種設定施策の効果が定量的に示された。

3. 保守業務への最適化技術の適用

本章では、設備保守に関わる諸業務や今後展開が予想される設備モニタリングシステムの導入・運用に関わる最適化事例について紹介する。

(1) 軌道保守計画策定支援システム

軌道保守計画策定支援システムの研究⁶⁾では列車の走行安全性および乗り心地を確保するために実施される軌道保守計画を短期的視点および長期的視点から評価・最適化する手法について検討している。これまでに、マルチ運用計画システム、レール削正車運用計画、および軌道モーターカー運用計画システムを開発し、実用に供してきた。さらに、マルチ保守、レール交換および削正、道床交換を対象とした長期の保守計画を数理最適化手法により作成する手法についても検討している(図4)。ロット別保守計画モデルでは、軌道状態の履歴データに基づき、将来の各ロット別の劣化状態を予測し、ロット別に保守計画を作成する。このモデルでは、適切な時期に材料保守を行うことによる、その後の保守量の減少を勘案することができるため、計画期間中のトータルの保守費用を最小化することができる。全ロット保守計画モデルでは、年度保守量および予算上限制約等を考慮しながら、ロット別保守計画モデルの結果にできるだけ近くなるように、全ロット保守計画を作成する。これにより保守量や費用が各年度での平準化が可能になる。

(2) 保守現場向け勤務計画作成システム

保守現場向け勤務計画自動作成システム⁷⁾の研究では、現在人手で作成されている保守区の勤務予定表を数理計画法により自動作成するシステムを開発した(図5)。開発したシステムは、多岐に渡る制約条件を考慮しつつ、事前に与えられた一月分の作業計画に対応した勤務予定表を数10秒程度で作成することが可能である。開発したアルゴリズムでは、休日出勤や夜勤の回数が偏らないように、平準化を行なっている。また、突発的な作業が月途中に発生したなどの事情のために、勤務計画を変更せざるを得ない場合には、できるだけ変更箇所もしくは変更の影響を受ける人数を最小化する計画変更を行う機能を実現した。さらに、作業負荷の波動に柔軟に対応するため、他グループからの支援を考慮した勤務計画を作成する機能も実現している。本システムを用いることにより、勤務計画作成担当者の負担が軽減され、担当者の勤や経験に頼ることなく、質の高い勤務計画を作成することが可能となる。

(3) 設備監視用センサネットワークの構成最適化

設備モニタリングシステムにおいてセンサデータ伝送手段として使用されるセンサネットワークの配置を最適化するための研究にも取り組んでいる。電力消費を考慮したセンサネットワーク設計の最適化に関する研究⁸⁾では、ネットワークを構成するノードの電力消費モデルに基づいて、ネットワーク全体の電力寿命を最大化するためのヒューリスティック手法を開発した。ネットワーク全体の電力寿命は、最も早く電力が枯渇するノードに依存するため、各ノードの電力消費をできるだけ平準化する(各ノードの中で、電力消費が最大のものの消費電力を最小化する)ように、ゲートウェイの設置箇所と各ノードからのデータ収集ルートを決断する問題として定式化している(図6)。なお、最適化手法としてはライフスパン法と呼ばれるヒューリスティック探索手法を用いている。実構造物(地下鉄トンネル)に設置したセンサネットワークから得られたデータに、上記提案手法を適用した結果、提案手法によって、既存の構成に比べてバッテリー交換周期の延伸と低コスト化が実現できることを確認した。



図4 軌道保守計画策定支援システムの概要

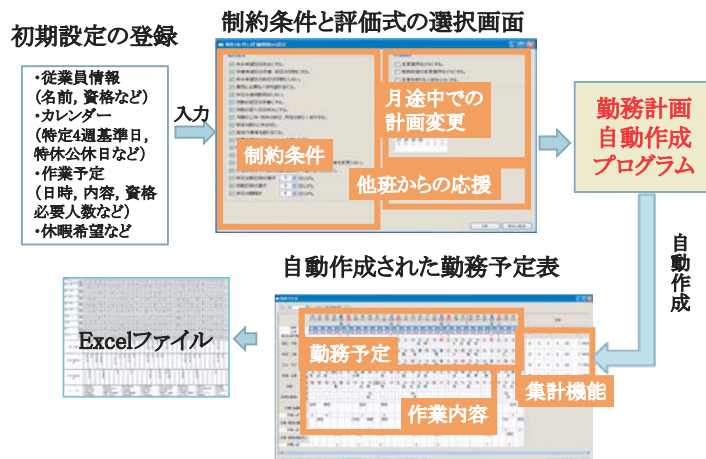


図5 保守現場向け勤務計画自動作成システム

特集：輸送情報技術

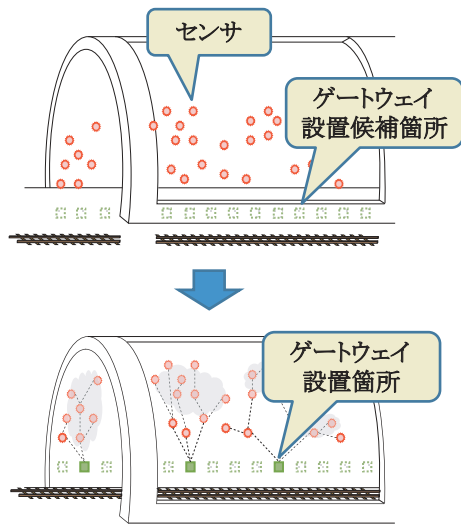


図6 センサネットワーク構成の最適化

4. 今後の展望

4.1 先進的計算機技術の活用による性能向上

近年の計算機性能の飛躍的向上、並列計算技術の進展等の結果、従来は、解くことのできなかつた大規模な最適化問題が実用的な時間で解ける環境が整いつつある。すでに、マルチコアプロセッサ上での並列計算に対応した商用の最適化ソルバもあり、様々な応用での活用が進んでいる。鉄道総研においてもマルチコアによる並列処理の効果を評価するため、既存のアルゴリズムの並列化を試みたところ、4スレッド並列実行で実行時間が3~4割程度に削減できることを確認した。また、クラウドコンピューティング技術を活用することにより、仮想化された計算資源を動的に確保しつつ、並列処理により性能を向上させる手法も一般化しつつある。クラウドコンピューティングは、大規模データ処理(データインテンシブアプリケーション)との親和性が高いという特徴があり、大規模ネットワークデータを用いた経路探索アルゴリズム等での活用が期待されている⁹⁾。以上のような先進的な計算機技術の援用による、最適化処理の性能向上については引き続き、調査研究を進めていく予定である。

4.2 データ分析・予測技術と最適化技術の融合

これまでの多くの最適化手法適用例では、すべての必要なデータや条件があらかじめ(所与のものとして)与えられ、最適化アルゴリズムに対して入力されることが多かった。しかし、前述のデマンド輸送や軌道保守計画の例のように、将来予測結果(直近の旅客需要の予測や中長期的な軌道状態の劣化予測)を考慮した最適化が求められる場面もある。また、鉄道総研では、様々な分野を対象に、センシングデータを活用した設備保全の効率化の研究にも取り組んでいるが、そこでも異常予兆の検出と将来予測に基づく保全計画の最適化が主要な課題となっている。

これらの応用においては、対象領域に応じたデータ分析・予測技術と最適化技術との融合が不可欠であろう。引き続き、この分野の検討の深度化を図っていきたい。

4.3 数理最適化技術の適用範囲の拡大

これまで取り組んできた最適化技術適用事例の多くは計画作成問題と位置付けられるものであった。最適化技術の適用先としては、この他にも、様々な機器設計、制度設計等を含む設計問題への応用や現象解明、モデリング等での活用可能性についても検討が必要と考えている。現在、鉄道技術の各分野への数理最適化技術の適用可能性について、これまでの適用事例に捉われず、幅広く調査検討活動を進めているところであり、結果がまとまった段階であらためて報告したい。

5. おわりに

鉄道分野における数理最適化技術適用の動向について鉄道総研での取り組みを中心に紹介した。合わせて数理最適化技術の鉄道における今後の活用可能性について展望した。本稿で紹介したものを含め、我々の研究活動に、様々な角度から忌憚のないご意見をいただければ幸いである。引き続き、情報技術を応用した鉄道輸送の効率化、利便性の向上等に向け、研究開発を深めていきたいと考えている。

文献

- 1) 佐藤圭介, 福村直登: 機関車運用整理案作成アルゴリズムの開発, 鉄道総研報告, Vol.24, No.10, 2010
- 2) 坂口隆, 佐藤圭介: 旅客列車を対象とした車両運用整理アルゴリズム, 鉄道総研報告, Vol.25, No.12
- 3) 加藤 怜, 佐藤圭介, 福村直登: 乗務員基地配置駅決定アルゴリズムの開発, 鉄道総研報告, Vol.24, No.10, 2010
- 4) 坂口隆, 福村直登, 佐藤圭介, 加藤 怜: 日別需要に基づく鉄道輸送計画作成手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.24, No.10, 2010
- 5) 柴田宗典: デマンド推定に基づく柔軟な指定席・自由席設定手法, 鉄道総研報告, Vol.24, No.10, 2010
- 6) 三和雅史: 軌道保守計画策定支援システムの開発, 鉄道総研月例発表会 (2010年4月)
<http://bunken.rtri.or.jp/PDF/cdroms1/0011/2010/0011001899.pdf>
- 7) 尾崎尚也, 羽田明生, 佐藤紀生: 保守区の勤務形態に対応した勤務計画作成システムの開発, Vol. 23, No.8, 2009
- 8) 羽田明生, 土屋隆司: 電力消費を考慮したセンサネットワーク設計の最適化手法, 鉄道総研報告, Vol.24, No.10, 2010
- 9) 藤澤克樹, 安井雄一郎, 高宮安仁, 佐藤仁: 最適化分野におけるクラウド技術の利用, オペレーションズ・リサーチ, Vol.56, No.6, 2011