

早稲田大学大学院情報生産システム研究科

博士論文概要

論文題目

鉄道輸送サービスにおける
車両運用計画支援システム
に関する研究

申請者

竹内 友恵

情報生産システム工学専攻
生産情報制御研究

2018年 6月

環境負荷が低く大量輸送が可能な鉄道輸送システムは日本の交通インフラとして主要な役割を担っているが、近年の鉄道輸送ニーズの高度化に対応した路線延長、相互乗入れなどの拡大によりその運用が複雑化しており、鉄道輸送システムを効率的に運用する運用支援機能が重要かつ不可欠である。特に車両運用計画は列車の定時運行に必要な機能であるが、車両状態や走行実績に応じた判断が必要であり、運用担当者の人手に依存する部分が多くシステム化が遅れている。更に、少子化が進む中で熟練運用担当者のノウハウ伝承が課題となっている。

鉄道輸送システムにおける車両運用計画は、列車ダイヤを運行するための列車への車両の割当てを計画する車両割当計画と運行乱れ時に車両割当計画を変更する車両運用整理がある。車両割当計画においては、車両の定期検査や列車ダイヤで定義された車両数、車両を管轄する車両基地などを考慮する必要がある。また、使用可能な車両や保守作業内容など車両割当計画を作成する上で前提となる状況が車両状態に応じて変更されることも多いため再計画が必要であり、高い応答性が求められる。従来研究では、車両割当計画の自動作成を目的に整数計画問題または混合整数計画問題としての定式化と車両割当計画を作成する解法が提案されている(A. Alfieri et al., 2006)。これらの研究は最適解を求めることができるが、対象問題のスケラビリティを考慮すると計算時間に改善の余地がある。また、車両運用整理は、列車の運行状況や運行乱れの発生時間帯、翌日の車両運用計画といった様々な要素を勘案しながら運行当日の車両運用計画を変更する作業である。現場の混乱を防ぐため、元の計画からの変更数や翌日への影響を抑えることが求められる。

本研究では、車両運用計画作成の計算機による支援を目的に、車両割当計画と車両運用整理の双方について、計画作成者のノウハウをモデル化することで質のよい実行可能解を効率的に探索するスケジューリングアルゴリズムを提案する。提案手法は、実際の運用データを用いた数値実験により、有効性を確認した。

本論文はこの研究成果をまとめたものであり、全体で7章から成る。以下その概要を述べる

第1章「序論」では、鉄道輸送サービスにおける車両運用計画のシステム化につながる技術動向を明らかにし、そのニーズと重要性を示した。

第2章「鉄道輸送計画」では、車両運用計画とその関連計画を含む「輸送計画」について全体像を明らかにした。

第3章「車両運用計画」では、車両運用計画の概要とシステム化における技術課題を示した。まず、車両運用計画で用いられる用語を定義する。「列車」は、輸送サービスの提供単位であり、始発駅から終着駅までに通る駅、各駅への到着・出発時刻、必要な車両数によって定義される。「編成」は、複数の車両を連結した車両の組であり、列車への割当てや車両の定期検査は編成単位で実施される。「行路」は、同一編成に割振る列車の組である。車両運用計画は、車両の維持保守をしながら鉄道輸送サービスである列車に編成を割当てる計画であり、ダイヤ

改正の際に作成される「行路計画」と、日々の運行に関する「車両割当計画」と「車両運用整理」から成る。本研究では日々の運行を対象とする。

車両割当計画は全ての行路に編成を割当てることと、定期検査の実施回数を抑えつつ所定の検査周期を遵守するように定期検査日を決定することが求められる。また、実際の現場では、車両状態に応じて定期検査以外の保守作業が必要となり、計画作成後に修正されることが多い。このため、システム化に際してはできるだけ計算時間が短いこと（応答性）が求められる。以上より、応答性の高い車両割当計画アルゴリズムの必要性を示した。

車両運用整理では、列車運行状況を反映して各編成に割振られている行路自体つまり行路に含まれる列車の組を変更する。行路の変更においては、同一編成に割振る列車の時刻と駅の整合性、編成を管轄する車両基地、列車ダイヤで定義された列車の両数などを考慮する。運行乱れ時はこれら全てを満たすことができないケースも多いため、システム化に際しては最適解ではなく代替案を含めた解を提示することが求められる。以上より、複数の候補解を提示する車両運用整理アルゴリズムの必要性を示した。

第4章「**関連研究**」では、一般的な車両運用計画の研究として、車両運用計画をネットワークモデルで表し、経路の組合せを探索することで計画を作成する解法のサーベイを示した。また、鉄道輸送サービスにおける車両運用計画の研究として、車両割当計画および車両運用整理に関するサーベイを示した。

車両割当計画における従来研究では、数日間の短期計画を対象に車両運用コストや検査コストを最小化する最適解を求める提案がされている(J. Andrésa et al., 2015)。数日分の計画に対して15分以上を要しており、半月や1ヶ月におよぶ中期の計画への適用は応答性の面で課題がある。一方、車両運用整理における従来研究では、単一目的に対する最適解を一つ提示する研究がほとんどであり、複数解を提示する提案はされていない。

以上より、本研究の対象課題に対して従来研究は不十分であることを示した。

第5章「**検査周期を考慮した車両割当計画**」では、応答性の高い車両割当計画に対する提案を示した。行路には、定期検査を実施可能な行路と実施できない行路が存在しており、検査周期を少ない検査回数で遵守するための編成に対する行路の割振り順序に関するノウハウ（行路の順序パターン）が存在する。本研究では、このノウハウを用いて検査周期を遵守しやすい行路の割振り（計画の雛型）を作成し、その後、計画の雛型を変更しながら行路に編成を割当てることで解の探索を効率化した。

行路の順序パターンはネットワークモデルのリンクの重みとしてモデル化し、行路の順序パターンをできるだけ多く含むリンク集合つまり経路を編成数と同じ数だけ探索することで検査周期を遵守しやすい計画の雛型を作成した。経路探索は、一つの最短経路を求める既存のヒューリスティックアルゴリズムであるダイクストラ法と、経路をまたがるグローバル制約をネットワークモデルの変更に

より考慮する制約伝播とを組み合わせることで効率化した。

計画の雛型を作成した後は、各編成の運用実績と検査周期を考慮しながら雛型に編成を割当て、かつ定期検査の実施日を設定した。検査周期を満たすように定期検査を設定できない場合は計画の雛型を変更する。雛型の変更は、ネットワークモデルを部分的に変更しながら経路探索を実行することで探索範囲の広がりを抑えながら実施するようにした。

実際の大規模車両基地のデータ（67編成、30日分）を用いた実験により、解の探索効率が向上し、分枝限定法や切除平面法など複数のアルゴリズムを組み込んだ最適化ソルバと比較して実用的な時間内（24時間以内）で得られる解の質を向上できるすなわち検査実施回数を35.0%低減できることを示した。

第6章「**運行乱れ時の輸送サービス維持を考慮した車両運用整理**」では、複数解を提示する車両運用整理に対する提案を示した。解の選択基準は運行状況や車両の運用実績に応じて変わるため、計画作成者が観点を変えた選択ができるよう、鉄道輸送サービスや車両運用に関する制約を表す車両運用制約モデルを提案し、このモデルを用いて各制約を緩和した場合の解を提示するアルゴリズムを提案した。列車間の制約と車両運用に関する制約をネットワークモデルで表すことで車両運用モデルを定義し、制約緩和の処理を車両運用モデルの変更操作として定義することで、効率的な解の探索と制約緩和を実現した。

車両運用モデルは、列車間の時刻・駅の整合性、列車両数にあわせて複数の編成を結合する運用、運用終了後に編成を戻す駅の指定といった車両運用に関する制約条件を定義したネットワークモデルである。

解の探索アルゴリズムでは、車両運用モデルから編成の数だけパスを探索することで行路を変更する。計画作成者が実施している行路変更のノウハウを用いて解候補のパスを予め列挙することで探索を効率化した。行路変更のノウハウは、元の行路に含まれる列車を行路間で部分的に入れ替える変更である。これを車両運用モデルのリンク操作として定義することで解候補のパスを列挙した。解候補から解に含めるパスの組合せを探索する際には制約プログラミングを用いたバックトラック法を用いた。あわせて、緩和可能な制約は緩和の処理を車両運用モデルの変更操作として定義することで、ネットワークモデルを用いた解の探索アルゴリズムを変えずに制約緩和を可能とした。これにより、解が見つからない場合に制約緩和した実行可能解を複数提示できるようにした。

実際の中規模線区のデータ（50編成、430列車）を用いた数値実験により、制約を緩和することで実験データ18ケースのうち55.6%に対して複数の実行可能解を得られ、全体の44.5%で輸送サービスと車両運用双方の観点から許容範囲内の解を得られることを確認した。なお、実験データの44.4%は運 が必要つまり車両運用に関する制約緩和だけでは対応できないことを確認した。

第7章「**総括**」では、第5章と第6章で示したスケジューリングアルゴリズムについて総括した。更に、実用化に向けた課題を示した。