

博士論文審査結果報告書

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 9月

環境負荷が低くかつ大量輸送が可能な鉄道輸送システムは日本の主要都市における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過密運行ダイヤ、路線延長、相互乗入れなどの拡大によってシステムの運用がさらに複雑化している。また、少子化に対し運用管理担当者が有する計画作成ノウハウの継承も課題となっている。このような背景のもと、鉄道車両や運転要員等の有限な資源を使用し、複雑化する鉄道輸送システムを効率的に運用するには、システムの運用計画作成の計算機による支援が不可欠である。鉄道輸送システムにおいて、乗客に対する輸送サービス計画である列車の運行スケジュール（列車ダイヤ）の作成を計算機で支援するシステムがすでに実用化されている。ここで、列車とは列車識別子、始発駅から終着駅までの各駅の到着・出発時刻、および輸送に使用する車両数により定義される仮想的な輸送サービス単位である。一方、列車ダイヤを運用する資源の一つである鉄道車両編成（車両）を効率的に運用するための車両運用計画の作成や修正は、車両管理部門の計画者により大部分が人手で実施されており、計算機による計画作成の支援は進んでいない。その主な理由として、車両状態や車両保守作業の進捗により使用可能な車両編成が日々変化するもとで列車への車両割当を柔軟に行う必要がある、車両定期点検の期間制約や車両の管轄基地の場所的制約などの多種類の制約条件を総合的に判断して車両割当を柔軟に行う必要がある、列車運行乱れの発生状況に応じ車両割当の修正を柔軟に行う必要がある、車両運用計画担当者のノウハウを計算機に実装するための適切なモデルがない、などが挙げられる。

本論文はそれらの課題に対する一つの有効な解決方法を示したものである。具体的には、列車ダイヤにもとづいて運行される行路に車両を割当てるときに考慮すべき列車の運用条件を、時間軸で展開したネットワークモデルで記述する方法を提案している。ここで行路とは始発と終点で連続する接続条件を満たす一つ以上の列車の組である。次に、車両運用計画者が有する車両割当に関するノウハウを上記ネットワークモデル上のパス探索ルールとして記述し、許容される時間内で最良の車両運用計画を効率的に作成するアルゴリズムを提案している。そして、実際に運用されている列車ダイヤと車両のデータを用いたケーススタディにより提案方法の有効性を確認している。

本論文は7章から構成されており、以下にその概要と評価を述べる。

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計算機支援に関する背景とニーズを指摘し、関連する技術動向について述べている。

第2章「鉄道輸送計画」では、鉄道輸送システムにおける運用計画の全体像を示した上で、列車ダイヤ作成と車両運用計画について、それぞれの機能と関連性について説明し、車両運用計画の作成を計算機で支援する目標について述べている。

第3章「車両運用計画」では、車両運用計画を構成する車両割当計画と車両運転整理について説明している。前者が列車ダイヤにもとづいて運行される行路に車両を割当てる機能であり、後者が遅延や故障等による列車運行乱れがそれ以降の列車運行に与える影響を最小化するように車両割当計画を修正する機能であることを説明し、そしてそれ

ぞれの計画作成を計算機で支援するために解決すべき技術課題について考察している。

第4章「**関連研究**」では、鉄道車両運用計画に関する従来研究をサーベイした内容について述べている。車両割当計画に関連する従来研究には、数日の短期間の列車ダイヤと最大10編成程度の限られた車両数を対象に、列車ダイヤで与えられる行路を満たしつつ、必要な車両検査回数を最小化する問題を数理モデルで定式化し、既存の組合せ数理計画ソルバを用いて最適解を求めた提案がある(J. Andrésa 他, 2015)。しかし、数週間から1ヶ月の期間の列車ダイヤと60~80編成の車両数を対象にした実用規模の車両割当計画を作成するには解探索性能(計算時間)の点で課題があり、車両割当に関する制約条件もシンプルであり、実際の複雑な制約条件では最適解が見つからない可能性がある。一方、車両運用整理に関連する実用レベルの従来研究はほとんど見当たらない。

第5章「**検査周期を考慮した車両割当計画**」では、車両割当計画の作成を計算機で支援する方法を提案している。まず、列車ダイヤで与えられた行路に割当て各車両に対して、定められた検査周期を最小の検査実施回数で充足する計画を作成する車両割当計画問題を、整数計画法にもとづく最適化問題として定式化している。次に、車両に対して割当可能な行路間の接続関係を日単位で時間軸展開したネットワークモデルで表し、計画者が有する車両割当のノウハウをネットワークモデル上のパス選択の順序ルールとして記述している。そのルールをランダム探索に組み込むことにより、以下の手順からなる車両割当計画アルゴリズムを提案している。まず各車両に定められた検査周期を最大限充足する車両割当計画(暫定解)を探索し、制約伝搬アルゴリズムにより行路間の接続関係を充足させながら検査周期に違反する車両割当を局所的に修正する。続いて、すべての車両の検査周期を満たす車両割当計画を複数解生成しその中の最良解を求める。暫定解の探索には、既知アルゴリズムであるダイクストラ法で重み付き最短経路を求め方法を用いている。大規模車両基地における車両割当計画で実際に使用されているデータ(車両編成数67、列車ダイヤ1か月分)を用い、提案アルゴリズムにより得られた解と、分枝限定法をベースとした既存の組合せ問題最適化ソルバ(Grobi)により得られた解の品質と計算時間を比較した結果、提案アルゴリズムにより、車両編成の検査周期を満たすために必要な車両検査実施回数を約35%削減できた。計算時間は、Pentium4(3.2GHz)、メモリ2GBの環境で提案アルゴリズムが15時間程度で最良解に収束したのに対しGrobiの場合は24時間でも解が収束しなかった。ランダム探索の求解精度を評価するために同じ実験データを用いて得た複数の解を比較した結果、必要な検査実施回数が最大となった解(最劣解)の検査回数は検査実施回数が最小の解(最良解)の約3%増であり、実用的な求解精度が得られた。なお、提案アルゴリズムで作成した最良解の検査実施回数は、車両運用計画者が数日をかけて人手で作成したものとほぼ同等であった。以上より、これらの提案には実用性が認められる。

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、遅延や故障等による列車運行乱れの発生がそれ以降の列車運行に与える影響を最小化するように、

既存の車両割当計画をリアクティブに修正する車両運用整理の方法を提案している。まず行路に対する車両割当の修正を最小化することにより、列車運行乱れ時以降の鉄道輸送能力をできる限り維持しつつ、予定ダイヤどおりに列車運行を継続するための計画修正問題を、整数計画法にもとづく多目的最適化問題として定式化した。さらに、列車運行乱れ発生以前に作成した車両割当計画の条件を、行路への車両割当を時間軸で展開したネットワークモデル（車両運用モデル）で表し、列車運行乱れの発生状況に応じて計画者が実施しうる車両再編成操作のノウハウ（例えば、列車に割当られた車両の滞泊駅の変更、異なる列車に割当られた複数の車両の結合や分割、列車の運転終了後に車両を戻す駅の変更など）をネットワークモデル上のパス接続変更による制約緩和ルールとして記述した。そのルールをもとに、制約プログラミングで用いるバックトラック法による探索を行い、列車運行乱れ時以降の列車運行への影響を最小化する車両割当の修正案を複数解探索し、計画者に提示するアルゴリズムを提案した。中規模線区で実際に用いられているデータ（車両編成数 50、列車数 430）に対し、列車運行乱れをランダムに生成させた 18 ケースに対して、提案アルゴリズムを適用する実験を行った結果、前章と同じ計算環境下で 5 分以内に、55.6%のケースに対して、予定ダイヤどおりに列車運行を継続し、輸送能力低下を 1 %以内に維持できる修正案が得られた。一方、朝のラッシュ時間帯を中心とする 44.4%のケースでは予定ダイヤどおりに列車運行を継続できる修正案が得られず一部の列車の運休が必要であった。運休が必要となるケースでは、割当可能な車両数に対して列車ダイヤの運行密度が上限に近い程度に過密になっていると考えられ、割り当て可能な車両数を増やすことにより運休となるケースを減らすことができることが分かった。以上より、これらの提案には新規性と実用性が認められる。

第 7 章「総括」では、本論文で提案した内容を総括するとともに、鉄道輸送システム運用のさらなる向上に向け、車両運用計画支援システムと既存の列車ダイヤ作成支援システムを協調的に連携するための将来課題について考察している。

以上を要約すると、本論文は、鉄道輸送システムにおける車両運用計画作成を計算機で支援することを目的とし、組合せ数理計画問題として計画問題を定式化するとともに、車両運用条件を記述したネットワークモデルを利用することで、計画者のノウハウを解探索に組み込んだ効率的な車両運用計画アルゴリズムを提案し、その有効性を確認している。提案したアルゴリズムを用いた車両運用計画支援システムは、鉄道会社においてプロトタイプとして試用されており実用的価値が高いものである。また、提案したアルゴリズムには新規性があり、かつ、学術的にも価値あるものと判断する。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2018年 9月11日

主査 早稲田大学 教授 工学博士 (東京工業大学) 村田 智洋
早稲田大学 教授 工学博士 (早稲田大学) 李 義頡

早稲田大学 教授 博士（工学）（早稲田大学） 藤村 茂