

博士論文審査結果報告書

論 文 題 目

鉄道輸送サービスデペンダビリティ向上のための
列車運用整理リアクティブスケジューリング技術の研究

申 請 者

佐藤 達広

情報生産システム工学専攻
生産情報制御研究

2012年 11月

環境意識の高まりや資源高騰等の理由から、環境負荷が小さく大量輸送が可能な鉄道システム復権の動きが高まっている。一方で都市の過密化に伴う列車ダイヤの高密度化、列車種別の多様化、相互乗り入れ運転の拡大等を要因として列車輸送業務が一層複雑化してきている。このような中で、不測事態の発生により大きな列車運行の乱れが生じると、社会生活や企業活動に与える影響は大きなものとなる。一方、高度に拡大した社会インフラシステムにおいて、不測事態の発生を含めたサービスの持続可能性や利用可能性を表す包括的概念であるデペンダビリティの重要性が議論されている。デペンダビリティの高いシステムとは、不測事態の発生においてもユーザやシステムの運用者にとって「頼りがいのある」システムやサービスである。重要な社会インフラである鉄道システムでは、不測事態の発生により列車運行に乱れが生じた場合においても、速やかに列車ダイヤ回復を行うことができるデペンダビリティの高い輸送サービスが求められている。

列車運行乱れ時に列車ダイヤを一時的に変更し、その後に平常列車ダイヤへの回復を適宜おこなう業務を列車運転整理と呼び、鉄道輸送サービスのデペンダビリティ向上のために重要な機能である。特に、変更された列車ダイヤに応じて、列車を実際に運行するために必要な資源である車両、乗務員、および車両基地（これらを列車運用資源と呼ぶ）の運用スケジュールを再作成する業務を列車運用整理と呼ぶ。列車運用整理においては、ダイヤ変更前にすでに作成された列車運用資源の割当て計画の大部分が、ダイヤ変更後の再計画における新たな制約条件となり得るため、それらの計画条件変更を動的に考慮しつつ、限られた時間の中で既存計画の再作成を行うスケジューリング機能（リアクティブスケジューリング）が必要であるが、それを計算機で支援するための研究は不十分であり、殆どが運用管理者の経験により人手で行われているのが現状である。このため、列車運用整理における車両や乗務員の手配ミス、それにとまなう列車ダイヤ回復作業の遅れといった問題も生じている。

このような課題に対し、本論文では、計算機による列車運用整理支援のために実現すべき要件と課題を提示し、それらを解決する方法として列車運用資源の割当てスケジュールを再作成するリアクティブスケジューリング方式を提案し、実路線を含む列車ダイヤと車両基地のデータを用いた数値実験により提案方式の有効性を示している。以下、各章の内容を要約し評価を行う。

第1章「序論」では、研究の背景と目的を述べ、本論文の構成について説明している。

第2章「関連研究および関連技術」では、リアクティブスケジューリング方式の研究開発についてサーベイし、本論文に関連する技術として、資源制約付きプロジェクトスケジューリング問題の研究動向について述べている。

第3章「列車運用整理業務におけるリアクティブスケジューリング」では、列車運用整理の概要を述べ、それを計算機支援するために必要な機能要件について述べている。すなわち、列車運行乱れ時に変更された列車ダイヤに合わせて列車運用資源の割当てスケジュールを再作成する「本線運用整理」の機能要件、および、変更された列車ダイヤに用いる

車両の保守・清掃作業を行う車両基地内での車両移動・配置スケジュールを再作成する「車両基地運用整理」の機能要件を明らかにしている。次に、これらの機能要件を実現するためには、（課題1）変更された列車ダイヤに対する列車運用資源である車両および乗務員の運用制約を最大限に充足しつつ、変更前の列車ダイヤに対応した計画からの列車運用資源割当て変更量（以下、計画変更量と記す）を最小化する新たな本線運用計画を再作成する、（課題2）車両基地における列車運用資源である多数の番線（作業や待機のために列車を停留させる引込み線路区間）の物理的なレイアウト制約、保守・清掃作業の作業順序制約を最大限に充足しつつ、変更前の列車ダイヤに対応した計画からの計画変更量を最小化する新たな車両基地運用計画を再作成する、ことが課題であり、それらを解決する必要があることを述べている。

第4章「本線運用整理のためのリアクティブスケジューリング方式」では、上記の課題1を解決するためのリアクティブスケジューリング方法を提案している。まず、乗務員交代や乗継ぎ可能な駅間の関係をトリップフローモデルとよぶネットワークフローモデルで表現することにより、変更された列車ダイヤに対する列車運用資源の制約条件を陽にモデル化している。次に、変更前と変更後の本線運用計画の差分、および列車運用資源に関する資源不足量をペナルティ線形和として与えた目的関数の最小化を行う0-1整数計画問題として本線運用整理問題を定式化している。さらに、定式化した問題を効率的に解く2通りの解探索アルゴリズムを提案している。（方式1）として、上記で定義したスケジューリング問題を資源ごとの資源最適割当て問題と資源不足を最小化する問題の2つの部分問題に分割し、近似最適化技法であるラグランジュ緩和法により最適値の下界と上界のギャップを計算することにより、解の最適性評価を行いつつ、変更前計画からの計画変更量を最小化する本線運用計画再作成アルゴリズムを提案している。また、（方式2）として、運用管理者の経験に基づく制約解消ヒューリスティクス（以下、従来手法と記す）で生成した初期解を局所探索法により改良する生成検査型アルゴリズムを提案している。これにより、方式1の目的関数に加えて、非線形な評価指標である全車両の折り返し時間標準偏差、および各車両の走行距離の差分総和を含めて目的関数を最小化する本線運用計画再作成アルゴリズムを明らかにしている。

提案アルゴリズムの有効性を評価するために、比較的大規模な実路線（列車本数786本、車両数185）をケースとして、列車運行乱れ時に変更された列車ダイヤの実データを用いて数値実験を行っている。その結果、方式1では約800回の反復計算（実行時間約40分：CPU3.0GHz, 3.5GBメモリ）で実行可能な新たな本線運用計画を生成でき、変更前計画からの計画変更量は約35%であり、かつ計画変更量に関する最良下界値との誤差が1.56%であることを示している。方式2では、約123回の反復計算（実行時間約6分）で実行可能な本線運用計画を生成でき、変更前計画からの計画変更量、全車両の駅折り返し時間標準偏差、車両の走行距離の差分総和について、従来手法で求めた初期解と比較して、それぞれ6.9%、52%、33%の改善が得られることを明らかにしている。比較的大規模な実路線

における列車ダイヤ変更データを用いて、変更前計画からの計画変更量の最小化を含む多目的な目標を達成する実行可能解を高い割合で効率的に生成している点が評価できる。

第5章「車両基地運用整理のためのリアクティブスケジューリング方式」では、上記の課題2を解決するためのリアクティブスケジューリング方法を提案している。まず、車両基地における番線を列車運用資源と見なすことにより、番線の物理的レイアウトを資源制約条件として記述している。次に、競合のない特別な列車運用資源（バッファ資源）を導入して解の実行可能性を示す資源不足量を指標化し、それに変更前計画からの計画変更量をペナルティとして加えた制約充足最適化問題として車両基地運用整理問題を定式化している。さらに、定式化した問題を効率的に解くアルゴリズムとして、制約充足解を探索する制約プログラミングと変更前計画からの計画変更量の低減に寄与する資源割当て順序選択ヒューリスティクスを組み合わせた車両基地運用計画再作成アルゴリズムを提案している。

提案アルゴリズムの有効性を評価するために、番線レイアウトの構造が異なる3種類の一般的な車両基地に対し、それぞれ3通りの車両運用乱れデータを表す1080個の実験データを用いて、車両基地運用計画の再作成実験を行っている。その結果、秒単位のオーダー（0.02～1.59秒）で計画の再作成が可能であり、約98%の割合で実行可能解が得られ、変更前計画からの計画変更量として、実行可能解のうち96.9%が番線変更回数0回、車両移動順序に関する平均変更回数が1.57回（全移動回数の2.7%）、その3倍以内の移動順序変更回数のもので全実行可能解のうち91.1%、番線への車両入線時刻修正のみでの実行可能解が得られたものが全実行可能解のうち42%であることを明らかにしている。多様な車両基地レイアウト形状の違いを考慮しつつ、計画変更量が少ない実行可能な車両基地運用計画を高い割合で効率的に再作成できることを示した点が評価できる。

第6章「結論と今後の課題」では本論文で提案した内容を総括するとともに、鉄道輸送サービスのデペンダビリティのさらなる向上に向けた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、列車運行乱れという非定常的な状況が発生した場合においても、速やかに列車ダイヤの回復を行ない、乗客に対してデペンダビリティの高い輸送サービスを提供し、列車運用資源の有効な運用を行うための列車運用資源割当てスケジューリングアルゴリズムと、それを利用した列車運用整理支援システムについて提案したものである。その一部はすでにプロトタイプとして適用されており、また、列車以外の輸送サービスにも応用が可能と考えられ、実用的価値が高いものである。さらに、提案した資源割当てスケジューリングアルゴリズムには新規性があり、学術的にも価値あるものと判断できる。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。

2012年 10月31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	工学博士	（早稲田大学）	吉江	修