

令和 4 年 5 月 14 日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04619

研究課題名（和文）鉄道の計画立案・意思決定の支援のための数理モデルに関する研究

研究課題名（英文）A study on mathematical models for planning and decision-making support in railways

研究代表者

今泉 淳（Imaizumi, Jun）

東洋大学・経営学部・教授

研究者番号：00257221

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は国内の鉄道業に発生する様々な計画立案・意思決定に対する数理モデル・方法の提案を目的とする。計画立案とは車両や乗務員などのスケジューリングのことである。意思決定とは時刻表作成や車両・乗務員のスケジューリングよりも上位の決定のことである。本研究では、車両のスケジューリング（運用計画作成）に焦点を当て、海外の数理モデルに関する研究を概観・整理し、日本の鉄道の諸条件を加味した運用計画作成のための最適化モデルをいくつか提案し、解を求める際のその挙動を分析してそれらの実用性に関して評価した。また、車両に関連する上位の意思決定に対して、車両運用計画作成のための数理モデルの用法の提唱も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、主として国内の鉄道業における各種資源、具体的には鉄道において重要な資源の一つである車両の効率的な使用計画を立案することを目的に、日本の実情・個々のケースの細部に合致するような数理モデルや方法を示してそれらの実用性を検証し、また、車両に関連する様々な意思決定を支援する目的での数理モデルの使用法の道筋を提示したことに本研究の学術的な意義がある。また、これらによって、鉄道事業者が効率的かつ経済的な輸送力・サービスを提供できること、そのための事前の各種作業を軽減化・効率化し、その結果として、利用者・事業者の双方に利益をもたらすこと、などを志向する点に本研究の社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to propose mathematical models and methods for various planning and decision making that occur in the railway industry in Japan. Planning is to make a schedule for rolling stock or crew corresponding to a timetable. Decision making is to decide something upper level than making a timetable or schedule for rolling stock or crew. In this study, we focused on rolling stock and its scheduling and proposed optimization models to create schedules under various conditions of Japanese railways, while surveying and organizing overseas studies on mathematical models for rolling stock scheduling. Then, after analyzing behaviors of these mathematical models through computational experiments when finding schedules from them, we evaluated their practicality. This study also advocated a usage of rolling stock scheduling models for vehicle-related upper-level decision making than scheduling.

研究分野：オペレーションズ・リサーチ

キーワード：鉄道 車両運用計画 最適化モデル 計画立案手法の拡張 車両に関連する意思決定の支援方法

1. 研究開始当初の背景

我が国の都市鉄道や新幹線の運行の頻度やその正確さは特筆するものがある。また鉄道は環境負荷に関して自動車や飛行機に勝りその重要性は益々高まる。そのような状況下において鉄道事業者はより効率的な輸送を求め、それゆえ各種資源の使用計画(スケジュール・運用計画)立案のための実務作業の支援は急務で、その基盤の数理技術の開発・確立が必要である。

ところで、鉄道の細部は国による違いがあり、それゆえ、ORを始めとする数理技術の開発はそれぞれの事情に合わせざるを得ず、結果としての技術は汎用的なものでは必ずしもない現状がある。もちろん、過去の成果で部分的に参考になるアイデアは可能な限り利用すべきであるが、状況・問題に対応したアプローチも必要となる。

一方、鉄道は装置産業で、初期費用がかかり建設したならば長きに渡り使用される性質を帯び、長期的視点からの検討は重要である。しかし、数理技術の活用の多くはダイヤ・時刻表に対応する各種資源の使用計画以下の段階のものがほとんどで、ダイヤ作成より上位の意思決定に対するアプローチが具体的にあるわけではない。よって、その種の意思決定のための補助ツールの提供は実務の助けになると考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、ひとつには、利用者に提供するサービスを記した時刻表上の列車に必須の車両や乗務員のスケジュール(運用計画)作成などのための数理モデルや解法の開発・拡張を目指した。そこでは、国内の車両運用や乗務員運用の計画立案の基本的な問題に対して基盤ができつつある現状において、それらで考慮されていない要因・それらで対応できない条件を含む問題や実務場面に発生する状況を想定し、その解決の足がかりを与えることを指向した。

もうひとつは、「上位の意思決定」を想定した数理モデルの活用の提案である。これは「既に時刻表があり、車両や乗務員の状況が所与」を前提として最適化により運用計画を作るのみならず、運用の前提となる諸条件そのものの検討、更には「ダイヤをどうするか」「車両基地・乗務員基地をどこに設置するか」などより高い視点の検討を意図したものである。これは、より長い期間を想定した戦略的・経営的視点の意思決定を想定しそれを支援することも目的とする。

このような目的を果たすため、技術・アイデアのヒントを求める意味で海外の研究の概観も行う。鉄道事情が違いため直接的利用は難しいとはいえ、鉄道という対象が共通であるがゆえに部分的に活用可能なものがある可能性は皆無ではない。一方、海外と日本の違いに関して言及はされるものの、海外の鉄道事情や運用ポリシーなどの違いを含めた系統的整理は必ずしも行われていない状況があった。

これらはORの数理計画を基点とし、そのような研究を概観しつつ、最適化モデル・解法などの提示を原則とする。最適化ツールが普及しつつある現状を踏まえると、鉄道事業者やそれらに実務システム・ツールを提供するメーカーにおける使用・実装の負荷を軽減することも期待できる。

3. 研究の方法

本研究課題では、国内の鉄道の各種資源の運用計画の作成を念頭に置いていたところ、調査や検討の結果、車両に主眼を置いた。車両は一般に高価でその導入には慎重な判断を要する上に、それを効率的に使用したいという事業者の切実な要望がある。

そこでは「基本計画」とよばれる毎日反復されるダイヤに対応した車両の運用計画を立案する。その実務的煩雑さから計画立案者を解放する観点から、日本の現状に合わせた基本的な問題の解決アプローチが確立されつつあるところ、事業者・車両の種類による違いや日本固有の事情を踏まえたモデル・方法の提示が次の段階として望まれている。

そこで本研究課題ではより現実的状況を踏まえた数理モデルの拡張を指向し、その際に生じる具体的解決事項や対処法を明らかにすることを目指した。また、車両運用計画作成モデルが上位の意思決定にどのように寄与し得るかも検討した。

(1) 休日の車両運用計画作成モデルの提案

通勤・通学路線は平日とそれ以外(休日)でダイヤが異なることが通例である。一方、日本の車両運用計画の典型例として「ダイヤに与えられた全列車の遂行順序」に対応する「交番」と呼ばれるものがあり、その交番中の1日単位の列車遂行順序が特定の車両の1日内の運用である「行路」(もしくは「仕業」)に対応する。一方、平日と休日でダイヤが違う場合、当初定めた「全列車の遂行順序」に整合しないことが生じるが、そこでは各行路の開始地と終了地を平日と休日で揃えておくことで対処する。そうすることで、ダイヤが違って行路内容が異なっても、特定の行路の発着地は平休で整合し運用上の矛盾は生じず、実務的作業を要しない。しかし、路線によっては列車数が多いなどの理由からこのような実務的作業に時間や手間を要するため、作業の効率化のための手法を提案する。

(2) 相互直通運転下における車両運用計画の作成モデルの提案

複数の鉄道事業者間で行われる相互直通運転は都市圏の事業者を中心に用いられている方法で、異なる会社の車両が相互に相手線に乗り入れ、シームレス化により旅客がターミナル駅で乗り換えることなく長距離を移動できる利便性を提供する方法として知られる。

だがそこでは、事業者相互で「相手線内での走行距離を等しくする」という条件が課された形で車両運用計画を作成する必要がある。複数の事業者が関係する計画立案は、それぞれの事業者固有の事情もあり、一事業者内の部署間の折衝や調整以上に難しい側面がある。そのような各社間の調整作業などを軽減する意味で、素案としての車両運用計画を数理技術により提案できることは意義が高い。一方、特に都市圏の鉄道事業者は多数の旅客を輸送するために高頻度で列車を運行しているため、数理的問題の規模が大きくなることが予想される。

そこで、相互直通運転が満たすべき条件や適切な尺度を考慮した上で、「どの列車をどの事業者の車両に」の決定を含む、複数の事業者の車両運用計画を同時に立案するモデルを、過去のモデル(主に Morito et al. [2])の修正により示し、その計算時の挙動、具体的には計画案の良し悪しと計算時間などを観察・分析する。

(3) 複数の基地の機関車の車両運用計画作成モデルの提案

国鉄やその後継の JR の車両運用計画である交番は、車両の種類等によって細部に差異があり、計画立案を支援する数理モデルもそれぞれに対応したものが必要となる。その交番には定期的な検査を組み込み、運用計画に従う限り検査のために追加の実務的作業を必要とせず、予定・運用を変更する必要もない。

ところで、貨物列車を牽引する機関車の定期的な検査は、検査後の定められた時間を期限としその前に検査を施行する必要があるが、既存の交番作成モデルでは対応できずその修正を必要とする。これを踏まえ、過去のモデル(Giacco et al. [1])に対して必要になる修正に関する議論をした上で修正モデルを提示する。なお、貨物列車はその運行範囲が広く機関車の基地が点在し、基地毎に車両運用計画を持つ必要がある。よって「どの列車をどの交番に」という、Morito et al. [2]に類似した決定を含むため、基地数(交番数)や列車数など問題規模の増大が求解に与える影響を併せて分析する。

(4) 車両運用計画作成モデルの上位の意思決定への活用

本研究課題のもうひとつの要である、数理モデルの、ダイヤの策定よりも上位、さらには経営視点の意思決定に資する用法に関する実験的試みである。

従来、計画立案に関する数理モデルは、日々繰り返されるダイヤに対応する車両や乗務員の運用計画に対するものか、より下位のものがほとんどだった。一方、ある意思決定段階のモデルを What-If 分析に用いて上位の意思決定をする考え方が他分野にはある。そこでこの考え方を鉄道分野にも応用し、車両を中心とした各種施策の検討を念頭に置いた、数理モデルの用法の提唱を行う。

その上で、ここでは具体的な線区をモデルケースとし、各種想定を与えて対応するモデル・パラメータにより What-If 分析を行うことを基本的枠組みとして想定した。そのために、実務的検討をしたい対象を車両運用計画作成モデルにどこまで盛り込めるか、それに対応したモデルの拡張などに関しても考える。その上でそのモデルをどのように活用できるかを考えるとともに、実用に供する観点からは最適化モデルがどのくらいの計算時間で解を与えるかを調査する。

(5) 海外の車両運用計画立案の数理モデルの調査と整理

本研究課題の動機づけのひとつとなっている、海外と日本の車両運用計画の考え方の違いやそれに起因する計画立案の数理モデルの違いに関する、調査・整理である。

一般に鉄道は、2本のレールからなる軌道上で車両を動かすことでどの国の鉄道も共通するが、それぞれの国の背景などもあり実際の中身に関しては必ずしも同一視はできない。とりわけ車両運用の側面から見ると、国内でも事業者によって考え方が違う場合やその細部が車両の種類で違うこともある他、国が異なると運用方針が違うこともあり、海外の研究がそのまま転用できるわけではなかった。

一方、そのような違いをある一定の視点から調査・考察する文献は見当たらず、体系的整理がされていない現状があった。本研究課題としてそのような現状に対して改めて整理を行う必要性を認め、本研究課題に関連して蒐集した研究論文を概観することとした。

4. 研究成果

(1) 休日の車両運用計画作成モデルの提案

この計画立案問題はある前提下では整数計画分野の集合分割問題として表現することができる。ここでは「行」を列車に、「列」を行路の候補に対応させている。一方、集合分割問題は整数計画問題であるがゆえに、問題の規模(この場合は列車数)の増大とともに行路の候補数が多くなり求解時間が長くなる可能性があることや、その制約条件の構造がゆえに整数実行可能解を確実に得ることなどへの工夫を要する可能性がある。

本研究では、実装の手間の軽減やモデル・解法の利用の手軽さの観点から、大規模問題に対する分割アプローチのひとつである列生成法を適用して列を動的に生成し、それにより整数計画

問題(最小化問題)の下界値を得ることを目指した。その上で、分枝価格法のような求解メカニズムとして最適性を保証するが実装に手間を要するアプローチを避け、下界値が得られた段階で生成済みの列(行路候補)から整数実行可能解を得るシンプルなアプローチを採った。そしてその際の計算時間を観察するとともに、整数実行可能解や最適解がどの程度の可能性で得られるかを、実際の路線に基づくデータにより数値実験を行い観察した。

そこでは、求解上ユーザーが制御可能なパラメータを変化させた際の挙動も含めて調べたが、整数実行解のみならず本来的な最適解が実用的な確度で得られることを確認した。具体的には、Core i7-6700 CPU の PC で列車数が最大で約 500 程度の場合を試したが、最大でも 1 分強程度で計算が終了し、整数解が得られない場合でもパラメータ変更により求解を繰り返せば実施可能な運用計画が得られると判断できる。一方、確実に実行可能解を得ることを目指すならば、分枝価格法の適用・実装がひとつの選択肢となる。

(2) 相互直通運転下における車両運用計画の作成モデルの提案

一般に車両運用計画を数理計画問題として表現する際の目的関数はいくつかあり得るが、利益を生み出さない「回送列車」の運行距離を目的関数としてそれを最小化することが考えられる。一方、相互直通運転では事業者相互の相手線乗り入れ距離(以後車両キロ)を等しくしたい。

そこでふたつ定式化を考えた。ひとつは、「車両キロの差の絶対値」をできるだけ小さくすることを目指し、それに適当な重みをかけ回送距離に加えたものを目的関数とするやり方(「定式化 1」)である。もうひとつは、車両キロの差の絶対値を目的関数の一部とするのではなく、相手線乗り入れ距離の目標値(X)とその許容誤差(Y)を意思決定者のパラメータとし、各社の相手線内の車両キロが $[X-Y, X+Y]$ に収まるような制約式を含むやり方(「定式化 2」)である。その上で、複数の交番を同時に作るモデル・定式化の基本部分は過去の研究(Morito et al. [2])のものを利用し必要な修正を施した。

ここで懸念されるのは運行する列車数の多さに起因する問題の大規模化に伴う計算量や、定式化の制約条件・目的関数の構造が計算にどのような影響を及ぼすかである。数値実験で扱ったのは事業者が 2 社と 3 社の場合で、Core i7-7700 CPU の PC で実験を行った。

2 社(列車数約 550)の場合、定式化 1 では車両キロの差が 0 の解(計画)が 45 分程度かかっていたのが、定式化 2 のパラメータ設定によって、車両キロの差が約 20 キロ生じる解が 1 分未満で求まった。3 社の場合、定式化 1 では計算に 3 週間以上もかかるのに対して、定式化 2 では車両キロ差が約 400 キロ生じるものの 3 日半程度で解が得られるという結果を得た。

これら結果は、列車数が多くなりがちな首都圏の事業者の相互直通運転では数値的アプローチによる支援が有効である可能性が高い一方、問題の大規模化に対する計算上の工夫がなお必要であり今後の研究の方向性のひとつを示唆している。加えて、ある尺度を目的関数に直接組み込み最適化に時間をかけるべきか、最小化が望ましい尺度であっても求解上の都合を優先して一定の許容範囲を与えて制約条件として相対的に短時間で解を得るべきか、問題解決者に選択肢を与えるものと位置づけられる。

(3) 複数の基地の機関車の車両運用計画作成モデルの提案

既存の交番作成モデル(Giacco et al. [1], Morito et al. [2])に対して、前述の機関車に関する条件を加味した修正を試みた。そこでは、検査前後の回送列車の設定に関してある仮定を置くことで、検査後の最初の列車の発時刻や検査前の最後の列車の到着時刻などに関するルールを定めることが可能となり、前述の検査に関する条件を一定の範囲で考慮できるようなモデルとなった。

一方、複数の交番を作る場合はその問題規模に応じて計算に時間がかかると考えられるため、その検証のために数値実験を行った。Xeon W-2145 の CPU の PC を用いた結果として、列車数が 100 以下で基地数・交番数が 2 程度であれば数分程度で最適解が得られるが、列車数が 100 を超え基地数もより多くなった場合には計算時間の増加が顕著だった。また、一部の基地の機関車の運用で、検査が前述の時間基準だけではなく距離基準(検査後の総走行距離が一定限度以下)も同時に考慮する場合についても実験を行ったが、制約条件式の追加の影響が計算時間の増加に現れた。

総じてこれら結果は、貨物列車の機関車の運用計画作成の支援の足がかりを与える一方、問題規模への対策の必要性が課題として浮き彫りとなった。たとえば近似解法の提案もひとつの方向性と考えられる。

(4) 車両運用計画作成モデルの上位の意思決定への活用

既存の車両運用計画作成モデル(主に Giacco et al. [1])に対して、具体的な線区や車両の条件・状況を加味しつつ、上位の意思決定対象のどのような要素をパラメータ・設定により盛り込めるかを検討した。その結果、相互直通運転の運用計画作成モデルでも考慮した夜間の留置場の容量(収容できる車両数の上限)に加えて、検査の施行可能地、検査に要する時間、検査が可能な時間帯、検査可能な車両数上限などが可能であると判断し、そのような要素を取り込んだ。また、複数のダイヤ案の比較、将来的な車両増備なども視野に入れて、使用車両数や検査施行数なども評価対象にするよう修正したモデルも構築した。計算時間についても数値実験で計測したが、列車数約 140 の路線の例題に対して Ryzen 5 3500 の CPU の PC でいずれも最大数分程度

で一定精度の解が得られ、その観点からの実用性も確認した。

上記に列挙した要因は運用計画立案者の立場からは所与の条件で、特に物理的な制約は変更することはできない。一方、ソフト的制約の場合は変更することが可能な場合もあり、その変更でより良い計画が立案できるのであれば変更を検討すべきである。物理的制約にしても、長期的な視点からはその変更の可能性もあり得る。

そこでそのような分析例を具体的に示した。すなわち、特定線区・車両に着目しその運用計画を作る最適化モデルを構築し、それを用いた分析を試みた。そこでは、先に挙げた運用計画立案時は通常固定されている要因を操作可能なパラメータとして、そのパラメータを変更して最適化を行い、それら結果を比較することで車両運用やその効率その他に変化・影響を与えるかどうかを分析する用法を示した。また、ダイヤ案の比較例も示した。

これらによって、車両運用の前提条件そのものの検討に加え、ダイヤ案を比較することや所要車両数を算定するなど、事業者の発想にはないような最適化モデルの用法を提示し、車両運用計画の作成のみならずより上位・長期的視点からの決定・判断に資する可能性を示した。今後の展望として、What-If 分析の範囲の拡張などが考えられる。

(5) 海外の車両運用計画立案の数理モデルの調査と整理

車両運用計画立案の数理モデルは海外でも数多く提案されており、把握できる範囲の国や事業者の運用方策とその数理モデルを概観した。数理モデル・数理技術の研究は欧米に多く見られるが、北米（アメリカ合衆国及びカナダ）と欧州では交通機関全体における鉄道の果たす役割や位置づけが異なり、整理の都合上、まず北米のそれに注目した。

北米は、飛行機が主要な移動手段である一方、旅客や貨物に対する鉄道の役割も一定程度あり、車両運用計画の立案を数理的に行うための研究、具体的には客車や貨車を牽引する機関車の運用計画や客車の運用計画立案のための研究・数理モデルがある。

日本では、ダイヤに対して交番による同一形式の機関車の同一・反復的な運用を前提としその都度の機関車の形式や両数の変更は原則的にないところ、合衆国の貨物列車の機関車は各種制約下で、一週間程度の計画として各列車の機関車の形式や両数を決める形で運用を行うことをはじめとする違いがある。カナダの旅客列車も列車の構成内容（列車編成）の変更を前提にし、過去の日本で旅客輸送の中心的存在であった客車のその当時の運用のやり方とは異なる。

すなわち、機関車が客車・貨車を牽引する本質は共通するものの、物理的制約以外の「車両を使用する際のポリシー」に上記をはじめとする違いがありそれが計画立案やその方法に影響を与え、これらを含む差異のためにそれらに対する数理モデルの日本の事例への直接的な適用は容易ではない。しかし、たとえば車両の動きを時空間ネットワークで表現した上で各種条件を定式化に反映させるやり方など、日本のある種の計画立案の一部に参考になる可能性があるものもある。また、問題の大規模化が避けられないため、分解手法を中心とした理論的背景を有する方法の積極的な適用が見られ、日本の問題解決の方向性のひとつとして位置づけられる。一方、欧州に対しても同様の整理が望まれる。

[参考文献]

[1] Giacco, G. L., D'Ariano, A., Pacciarelli, D. (2014) Rolling stock rostering optimization under maintenance constraints, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 18(1), 95-105.

[2] Morito, S., Fukumura, N., Shiina, T., Imaizumi, J. (2017) Rolling stock rostering optimization with different types of train-sets, *Proceedings of International Symposium on Scheduling 2017*, 4-9.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 今泉淳	4. 巻 98
2. 論文標題 北米の鉄道車両運用計画とその数理モデル 日本の車両運用計画との比較の観点から	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 経営論集	6. 最初と最後の頁 17-31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nakano Sota, Imaizumi Jun, Shiina Takayuki	4. 巻 2019
2. 論文標題 Optimization of Rolling Stock Rostering Under Mutual Direct Operation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Operations Research Proceedings	6. 最初と最後の頁 749 ~ 755
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-48439-2_91	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 今泉淳，椎名孝之，中野颯大
2. 発表標題 複数基地の機関車に対する車両運用計画の立案
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2022年春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今泉淳，椎名孝之
2. 発表標題 車両運用計画作成モデルによるWhat-If分析 - 方策案に対する試算・意思決定のORによる支援の可能性 -
3. 学会等名 第27回鉄道技術・政策連合シンポジウム（J-RAIL2020）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sota Nakano, Jun Imaizumi, Takayuki Shiina
2. 発表標題 Optimization of Rolling Stock Rostering using Mutual Direct Operation
3. 学会等名 OPERATIONS RESEARCH 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今泉淳, 椎名孝之
2. 発表標題 鉄道車両運用計画作成モデルの上位の意思決定への活用の試み
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2020年春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中野 颯大, 今泉 淳, 椎名 孝之
2. 発表標題 鉄道車両運用計画の定式化に対する相互直通運転の拡張
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2018年秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今泉 淳, 椎名 孝之
2. 発表標題 列生成法による鉄道車両の休日運用の作成
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2018年秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今泉 淳, 椎名 孝之
2. 発表標題 鉄道の休日ダイヤに対する車両運用計画のための列生成アプローチ
3. 学会等名 スケジューリング・シンポジウム 2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	椎名 孝之 (Shiina Takayuki) (90371666)	早稲田大学・理工学術院・教授 (32689)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------