

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

竹内 友恵

2018年 9月

早稲田大学審査学位論文（博士）

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

竹内 友恵

早稲田大学大学院情報生産システム研究科

2018年 9月

## 目次

第1章	序論	1
第2章	鉄道輸送計画	4
2.1.	基本用語	4
2.2.	輸送計画の全体像	4
第3章	車両運用計画	8
3.1.	行路計画（車両運用ダイヤ）	8
3.2.	車両割当計画	9
3.3.	車両運用整理	11
3.4.	本論文における研究対象の位置づけとシステム化の課題	12
3.4.1.	研究対象の位置づけ	12
3.4.2.	システム化の課題	15
第4章	関連研究	17
4.1.	車両割当計画に関する研究	17
4.2.	車両運用整理に関する研究	19
4.3.	車両運用計画に関連する計画技術	22
第5章	検査周期を考慮した車両割当計画	26
5.1.	計画目的と考慮すべき制約条件	26
5.2.	ネットワークモデルを用いた車両割当計画問題の記述	27
5.3.	数理最適化問題としての定式化	29
5.4.	最適化アルゴリズム	33
5.4.1.	概要	33
5.4.2.	基本フロー	35
5.4.3.	行路の順序パターン作成	36
5.4.4.	計画の雛型の作成（Phase 1）	38
5.4.5.	定期検査の割当て（Phase 2）	38
5.5.	提案方式の実験評価	39
5.5.1.	プログラム実装	39
5.5.2.	評価方法	40
5.5.3.	実験データ	41

5.5.4.	実験結果.....	42
5.6.	本章の総括.....	48
5.6.1.	結論.....	48
5.6.2.	今後の課題.....	48
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.....	50
6.1.	計画目的と考慮すべき制約条件.....	50
6.2.	車両運用整理問題のネットワークモデル記述.....	52
6.3.	数理最適化問題としての定式化.....	54
6.4.	制約充足解探索アルゴリズム.....	58
6.4.1.	編成行路計画の条件を満たす巡回路の列挙.....	60
6.4.2.	巡回路の組合せ探索.....	62
6.4.3.	制約緩和.....	62
6.5.	提案方式の実験評価.....	67
6.5.1.	プログラム実装.....	67
6.5.2.	評価方法.....	69
6.5.3.	実験データ.....	70
6.5.4.	実験結果.....	73
6.6.	本章の総括.....	86
6.6.1.	結論.....	86
6.6.2.	今後の課題.....	87
第7章	総括.....	89
7.1.	研究成果のまとめ.....	89
7.2.	今後の課題.....	91
	謝辞.....	94
	参考文献.....	96
	研究業績一覧.....	105



## 第1章 序論

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複雑化している。その一方で、近年、我が国を含む先進国においては少子高齢化が進行しつつあり、総人口に対する高齢者の占める割合は現在の11%から20%、都市部では32%にまで達すると予測されている[1]。日本においても、2030年までに高齢化率は31.6%に達する見込みである[2]。これに伴い、鉄道輸送サービスの需要も減少すると見込まれており、人口の都市部集中により当面は現在の需要を維持するが、それ以降は減少する見込みである。以上より、利用可能な鉄道車両や運転要員等の有限な資源のもとで、複雑化する鉄道輸送システムにおける更なる業務効率向上が重要かつ不可欠となっている。あわせて、これまで鉄道輸送を支えてきた熟練者の大量退職も始まっており、運用担当者のノウハウ伝承が課題となっている。

鉄道における業務効率向上の取組みとして列車ダイヤの作成業務の支援とともに列車運行に関わる業務のシステム化が進められてきた。例えば、日本においては列車運行制御の分野で、1972年に東海道新幹線での中央集中型進路制御システム[3]が運用開始されたことを皮切りに進路制御システムの導入が進められ[4]-[7]、1990年代からは新幹線や地下鉄のような安全担保が比較的容易な路線に対する列車の半自動運転が導入されている[8][9]。ここ数年では、運行乱れに応じた列車ダイヤの変更業務のシステム支援や旅客流動の可視化など列車制御以外の業務に関わるシステム化も進められている[10]。

しかしながら、列車運行に必要なリソースである車両の割当スケジュールを行う車両運用計画の分野ではシステム化が遅れており、人手による計画が主流となっている[11]。その主な理由は2つあると考えられる。その一つは、車両運用計画が車両の定期検査スケジュール、車両基地における車両の滞泊条件、車両の行路間の接続条件などの多種多様な制約条件を車両の状態に応じて柔軟に考慮した組合せ最適化が必要となるためである。他の一つは、車両の整備や検査の結果、あるいは列車ダイヤの運行乱れ等によって車両の利用可否状態が動的に変化するため、静的な事前計画を行うことが難しいためであると考えられる。

本研究で対象とする車両運用計画は、走行実績や車両状態に応じて必要な検査を計画しつつ、輸送サービスに割当てる車両を決定する計画であるが、鉄道車両は一定の日数や走行距離以内に一度、定期的な検査を実施するように法令で定められており、新幹線のような長距離を走行する車両の場合は2日に一度、通勤列車のような比較的走行距離が短い路線でも3～5日に一度は検査が必要となっている。一方で、検査員や検査場所には限りがあるため、個々の車両が検査周期を迎える日と日々実施できる検査数の上限を鑑みながら各車両を割当てる輸送サービスと検査日を計画していく必要がある。管理対象の全ての車両に対して最低限次の検査までは計画しようとするすると車両運用計画の対象となる時間幅は数週間以上と広範囲にわたることが多い。更に、車両状態は予測できないため、突発的な保守作業や検査作業により作業時間が延長されることも多く、長期の計画がたてづらい。そのため、半月～1か月ごとにその時々の車両状態にあわせて1日～数日をかけて作成されており、定期的に手間を要する作業となっている。また、運行乱れ時のような迅速な判断が必要なときは、直近の状況のみを考慮して計画を部分的に再作成し、運行の乱れが落ち着いた後に翌日以降の影響を考慮して計画を修正していくといった段階を踏んだ対応がとられている。こうした計画自体の難しさに加え、車両の検査を実施する現場（車両基地）の作業環境や線路形状などに依存した現場特有の制約条件や運用ノウハウも多いため、それらのノウハウに対応して計画ロジックのチューニングが必要とされる。以上より、これまで車両運用計画のシステム化は遅れてきた。

こうした中、都市部を中心に路線間の相互乗り入れによる鉄道輸送のネットワーク化が進み、車両運用も更に複雑化してきている。車両は通常、管轄部署（車両基地）が決められており、同一の鉄道事業者が保有する車両であっても管轄部署でしか検査や保守が実施できない。このため、検査周期以内に管轄部署に車両を戻す必要がある。相互乗り入れにより走行距離が長くなると、その日のうちに管轄部署に戻れない車両も増加し、各車両の走行距離や走行日数にあわせて検査周期以内に管轄部署に戻すように計画を作成することが人手とノウハウだけでは難しくなっている。更に、列車ダイヤの過密化に伴い、列車ダイヤの運行乱れの収束の遅れや車両運用の非効率化が問題となっており、これまで人手に依存してきた車両運用計画のシステム化が求められてきている。

このように、車両運用計画では、車両状態にあわせた臨時修繕や検査の進捗状況に応じた計画変更など臨時対応が必要な要素が多く、通常考慮している全ての

制約を考慮することが難しいケースや通常とは異なる管轄部署で臨時検査を実施するなど条件自体が変更となるケースもある。ブラックボックス化された計画ロジックに基づく車両運用計画システムでは、これらの条件変化を柔軟に考慮することは困難である。このため、システム化にあたっては明示的なモデルを用いてこれらの計画条件を記述し、計画条件の変更に対応してモデルを変更することで柔軟な計画を行うことが必要である。また、車両の保守状態や検査結果に応じて、完全自動化ではなく計画作成者がインタラクティブに計画を作成することができる支援システムが必要である。

本研究は、鉄道輸送サービスの運用効率向上に寄与することを狙い、上述した車両運用計画のシステム化に必要な技術課題を明らかにし、それに対する解決案を提案するものである。なお、ここでの運用効率向上とは、検査回数や車両運用オペレーションの変更といった車両運用に関わる作業コストを抑えることを意図している。詳細は各提案の章にて示す。

本論文の構成については以下のとおりである。

2章では鉄道輸送計画全体の概要について述べ、車両運用計画の位置づけを説明する。3章では、車両運用計画の具体的な機能について述べ、そのシステム化のための課題について述べる。4章では、車両運用計画のシステム化に関する従来研究について述べる。5章では、車両運用計画をシステム化する上での主要な機能である車両割当計画において、車両運用に関する主要な制約条件と運用ノウハウをモデルベースで考慮できる最適化アルゴリズムを提案する。6章では、車両運用計画をシステム化する上でのもう一つの主要な機能である車両運用整理において、制約条件の緩和をモデルベースで行うことができる最適化アルゴリズムを提案する。7章にて本研究の総括を示す。

## 第2章 鉄道輸送計画

本章では、車両運用計画を含む鉄道輸送計画全体に関する基本用語と全体像を示す。

### 2.1. 基本用語

鉄道輸送サービスおよび車両運用計画に関する用語を以下に示す。

- (1) 列車：輸送サービスの提供単位である。始発駅から終着駅までの停車駅、各駅への到着・出発時刻、列車の定員数に相当する車両数（列車の車両数）、車両形式によって定義される。
- (2) 車両：乗客を乗せる最小単位の車体である。
- (3) 編成：複数の車両を連結した車両の組である。列車への車両の割当てや車両の定期検査は編成単位で実施される。
- (4) 乗務員：列車に乗務する乗組員である。列車を運転する運転士と列車のドアの開閉や乗客へのアナウンスを担当する車掌の2種類の職種がある。
- (5) 車両基地：車両の保管、検査、修繕の場所である。車両を留置する線路である「番線」が複数本存在する。
- (6) 乗務員区所：乗務員が出退勤する場所である。詰所と呼ばれることもある。乗務員は一日の乗務の開始と終了は必ず乗務員区所で点呼を受ける。

### 2.2. 輸送計画の全体像

輸送サービスの運行には、本研究が対象とする車両運用計画の他にも列車や乗務員、車両を留置・検査する車両基地の運用に関わる計画が必要となる。これらはまとめて「輸送計画」と呼ぶ。本節では、輸送計画の概要を示す。より詳細な説明は[12]-[14]を参照されたい。

輸送計画は大きく分けると「列車ダイヤ」「車両運用計画」「乗務員運用計画」「構内入換計画」から成り、これらがそろって初めて輸送サービスの運行が実行可能となる。列車ダイヤは輸送サービスの提供区間・時刻・内容を定義した計画であり、一日の運行における各列車の停車駅・時刻や車両形式・車両数など前節に示した列車の属性を定義する。その他の計画は輸送サービスを実行するた

めのリソースに関する計画であり、車両・乗務員・車両基地内の番線・進路といった各リソースの使用計画を定義する。

Fig. 1 に計画作成の流れを示す。

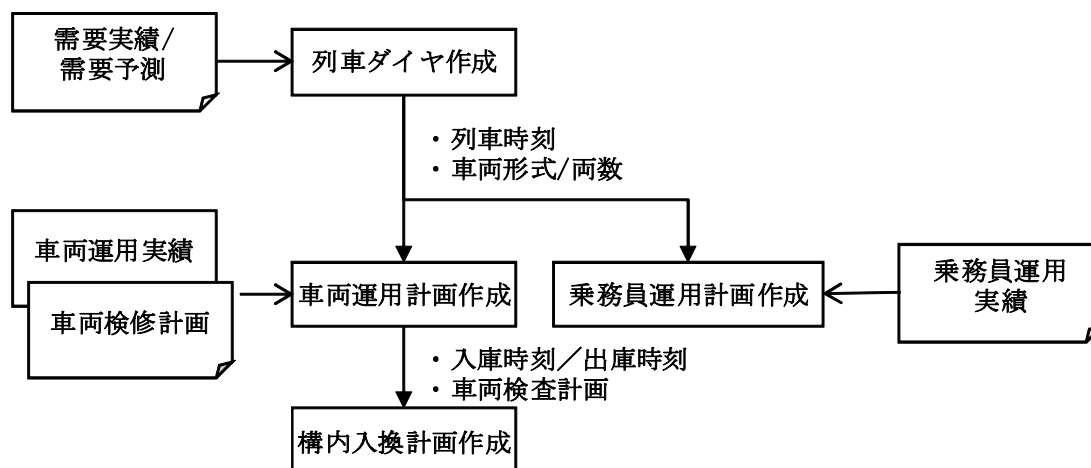


Fig. 1 計画作成の流れ

乗客の需要に関する実績や予測データを基に列車ダイヤが作成され、その後、車両と乗務員の運用計画が作成され、最後に構内入換計画が作成される。ただし、実際には、車両や乗務員の運用計画を作成してみると列車ダイヤで指定された車両形式や車両数、乗務員数が確保できない場合もあるため、列車ダイヤと車両・乗務員の運用計画は調整を繰り返しながら作成される。

以降、「列車ダイヤ作成」「乗務員運用計画作成」「車両運用計画作成」「構内入換計画作成」の概要を示す。「車両運用計画作成」は本研究の対象であるため次章にてより詳細に記す。

### (1) 列車ダイヤ作成

列車ダイヤは一日の営業時間内に走行する列車の計画である。過去の運行実績と乗車実績を基に各時間帯における需要を考慮して作成される。複数の形式の車両を使用している路線では車両数とあわせて必要な車両の形式も定義する。列車ダイヤは、曜日ごとの需要、年末年始やお盆など季節ごとの一時的な需要の変動、団体客（修学旅行やイベント列車など）の需要を考慮して作成される。

## (2) 乗務員運用計画作成

列車に対する運転士と車掌の乗務計画である。運転士は路線や車両形式ごとに必要な資格が定められている。また、車掌は、列車の車両数に応じて必要な数が異なる。都市の通勤列車の場合は必ず車掌が乗務することが多いが、郊外の1~2両の短い列車ではワンマン運転つまり車掌がいないケースがある。乗務員運用計画は、各列車に必要な資格や車掌数を考慮して作成する必要がある。乗務員運用計画の内容は車両運用計画の内容とほぼ同じであるため詳細は割愛する。なお、乗務員運用は車両運用よりも労働基準がある分、制約が多い。また、車両は列車の終着駅でのみ折り返すのに対して、乗務員は途中駅での乗務交代もある。

## (3) 車両運用計画作成

車両運用計画は、列車に対する車両の使用計画であり、編成単位に計画される。列車への編成の割当てを計画しながら車両の維持保守も考慮する必要がある。「行路計画作成(車両運用ダイヤ)」「車両割当計画」「車両運用整理」から成る。Fig. 2に車両運用計画の作成の流れを示す。運行前に、列車ダイヤを基に行路計画が作成され、その後、車両検修計画で計画された長期スパンの定期検査と車両運用実績を基に車両割当計画が作成される。運行当日、輸送障害や車両故障などにより列車ダイヤが変更された場合、変更された列車ダイヤを基に行路計画が修正される。

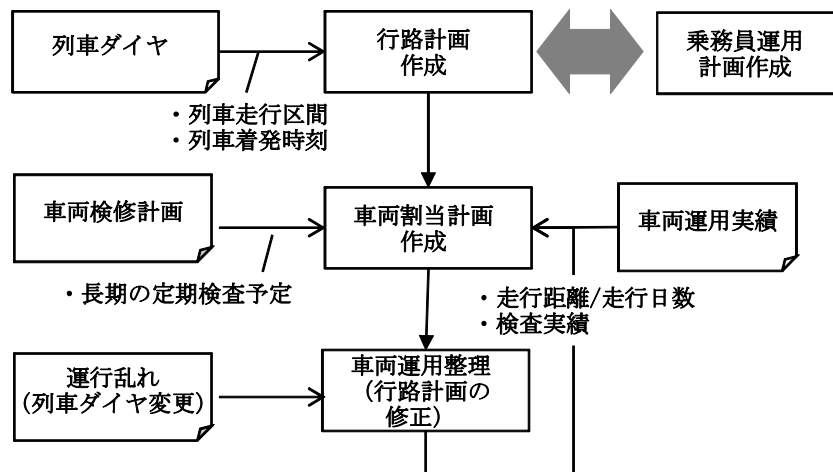


Fig. 2 車両運用計画作成の流れ

#### (4) 構内入換計画作成

車両基地における編成の移動作業の計画である。車両基地では、車両運用計画で計画された入庫時刻と出庫時刻を遵守しつつ、各編成への検査作業を実施することが求められる。検査作業が実施可能な番線は検査の種類ごとに決められているため、検査の開始時刻・終了時刻にあわせて編成を移動させる必要がある。

Fig. 3 に構内入換計画の例を示す。横軸を時間とし、縦に車両基地内の番線を並べており、各線分が個々の編成の番線への留置と移動を表している。図の最上部への移動は車両基地からの出庫を表し、図の最上部からの移動は車両基地への入庫を表す。この例では、編成 A, B, C それぞれが番線 A, B, C から 7:00 ごろに出庫する。出庫にあたっては、編成 B は番線 B から一旦番線 A に移動し、編成 A と併合した後、出庫している。また、編成 A は 9:30 ごろに入庫した後、番線 A を経由して番線 C に移動して留置される。編成 B は、10:00 ごろに入庫した後、番線 A を経由して仕業庫①に移動して定期検査の一種である仕業検査（詳細は 3.2 にて後述）を実施する。編成 C は 10:30 ごろに入庫した後、番線 A を経由して番線 B に留置される。これらの例に示したような番線間の動きは、車両割当計画で計画された定期検査を実施しつつ、移動に使用する進路の競合を避けながら列車ダイヤで決められた時刻に入庫・出庫するように計画される。

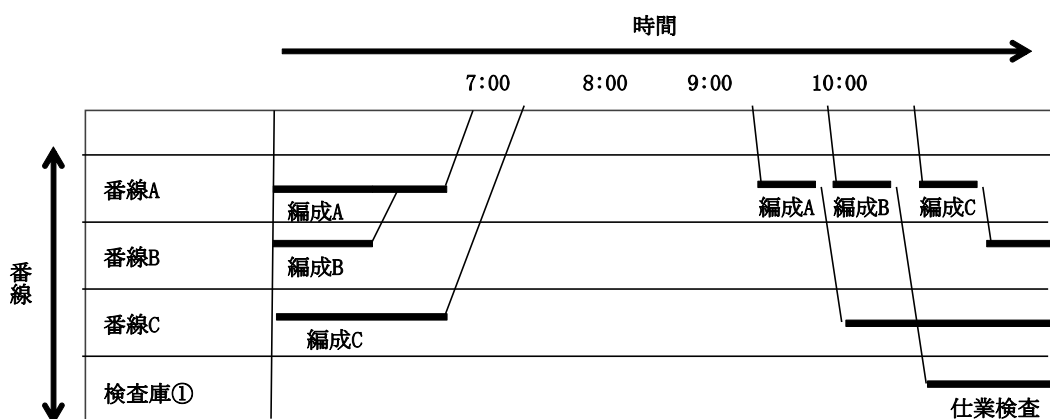


Fig. 3 構内入換計画の例

## 第3章 車両運用計画

本章ではまず、本論文の研究対象として 2 章で示した車両運用計画 (Fig. 2) を構成する 3 つの機能である「行路計画 (車両運用ダイヤ)」、「車両割当計画」、「車両運用整理」の機能について説明する。車両運用計画作成をシステム化する上での主要機能である車両割当計画と車両運用整理については、機能に加えてシステム化する上での技術課題について述べる。

### 3.1. 行路計画 (車両運用ダイヤ)

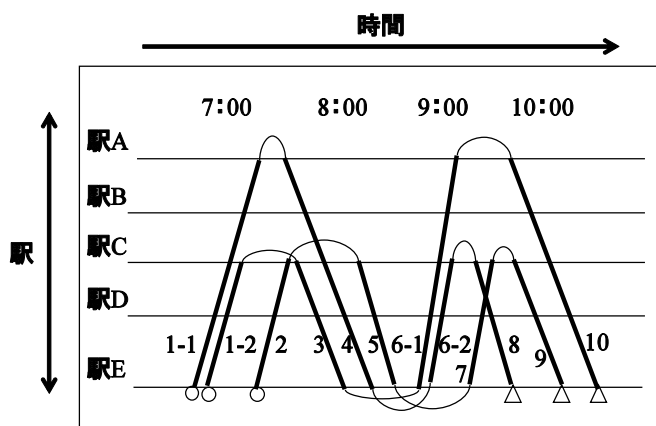
行路計画は、同一編成に割振る列車の組 (以降、行路と呼ぶ) の計画である。必要な編成の数を所定数以内に抑えつつ各列車に必要な車両数・車両形式を満たすように作成される。列車ダイヤに対して編成の数が足りていることを確認するために必要な計画であり、列車ダイヤと一緒に作成される。また、列車の行き先が途中から分岐している路線や郊外から都心に乗り入れる路線のようにエリアで乗車人数が大幅に異なるような路線では、複数の編成を併合して一つの列車に割当て、途中で分割して別々の列車に割当てるような運用を実施するケースがある。このようなケースでは、編成を併合する列車と駅、および分割する駅も計画する。行路計画では行路のみ決定し、行路に割当てる具体的な編成は後述する車両割当計画で決定する。ただし、これは日本国内のケースであり、海外では行路と編成の割当てを同時に計画するケースもある。

Fig. 4 は、行路計画を山ダイヤと棒ダイヤで表した例である。山ダイヤは列車の走行駅と時刻が分かるように表示した形式であり、横軸が時間、縦軸が駅、各線分が列車を表している。各線分の横に記された番号は列車を識別するための番号 (列車番号) である。同一の列車に複数の編成を連結して割当てる場合は編成の数だけ同一の線分を記載し、列車番号の後ろに枝分かれを意味する番号 (枝番号) を記載する。Fig. 4 の例では、列車番号と枝番号はハイフン (「-」) でつなげ、前方が列車番号、後方が枝番号となるように記載している。棒ダイヤは行路に含まれる列車が分かるように表示した形式であり、縦に行路をとり、それぞれの行路に含まれる列車を順に横に並べたものである。

Fig. 4(a) の例では、列車 1-1 と 1-2 は一つの列車に対して 2 つの編成を併合して割当て、駅 C で分割してそれぞれ別の列車すなわち列車 1-1 と列車 3 に割当



てることを示している。列車 6-1 と 6-2 も同様である。各列車を結ぶ曲線は、折返して同じ編成を割当ててることを示しており、例えば列車 1-1 に割当てた編成は駅 A で折返して列車 4 に割当ててることを示している。Fig. 4(b) の棒ダイヤでは、「○」が車両基地からの出庫を表し、「△」が車両基地への入庫を表している。例えば、行路 1 は、車両基地から出庫して駅 E から出発する列車 1-1 に割当てられ、駅 A で折返して列車 4 に割当てられ、以降、列車 6-2、列車 8 に割当てられた後、車両基地に入庫する。また、行路 3 は車両基地に入庫後、定期検査の一種である仕業検査を実施可能であることを示している。



(a) 山ダイヤ

行路1	○ 1-1 ——— 4 ——— 6-2 ——— 8 ——— △ E A A E E C C E
行路2	○ 1-2 ——— 3 ——— 6-1 ——— 10 ——— △ E C C E E A A E
行路3	○ 2 ——— 5 ——— 7 ——— 9 ——— △ 仕業検査 E C C E E C C E

(b) 棒ダイヤ

Fig. 4 車両運用計画における行路の例

### 3.2. 車両割当計画

車両割当計画は、行路へ割当てた編成を指定する計画である。前節に示した通り、各編成の運行実績や検査実績（運用実績）、検査計画を基に作成される。他の計画よりも作成頻度が高く、半月から1ヶ月単位で作成される。

Fig. 5 に、Fig. 4 に示した例を用いた車両割当計画の例を示す。車両割当計画は、計画対象の各日付について作成するが、本例では9月を例にとって車両割当

計画の例を示す。この例では、編成 A は、計画対象期間の開始日から終了日まで行路 1, 2, 3 の順に行路が割当てられている。編成 B, C も同様である。また、行路 3 においてのみ仕業検査を実施可能であるため、各編成は行路 3 を割当てられた場合のみ仕業検査を実施する計画となっている。なお、定期検査は、予め定められた検査周期以内に 1 回実施すればよいため、行路 3 が割当てられたからといって必ずしも仕業検査を実施するとは限らない。例えば Fig. 5 の例において行路 1, 2, 3 の順に行路が割当てられれば 3 日に一度、仕業検査を実施可能な行路「行路 3」が割当てられることとなるが、仕業検査の検査周期が 6 日以上の場合には行路 3 が割当てられるごとに毎回仕業検査を実施する必要はなく、2 回に一度のみで十分となる。

	9月1日	9月2日	9月3日		9月31日
編成A	行路1	行路2	行路3 (仕業検査)		行路1
編成B	行路2	行路3 (仕業検査)	行路1		行路2
編成C	行路3 (仕業検査)	行路1	行路2		行路3 (仕業検査)

Fig. 5 車両割当計画の例

前述の例に示した通り、行路の内容によって定期検査を実施可能な行路と実施できない行路が存在する。車両割当計画の作成にあたっては、各編成が、定期検査実施可能な行路に検査周期以内に割当てられるように作成する必要がある。定期検査を実施する周期は法律で定められており、検査内容に応じて主に以下の 3 種類から成る。

(a) 仕業検査

検査の種類は、パンタグラフや台車などの車両部品・装置の状態を目視確認する検査。検査周期は、通勤列車の車両で 3~5 日程度、新幹線では 1~2 日程度の周期で実施され、所要時間は 1~2 時間程度である。

(b) 交番検査

試験装置を用いた詳細な動作確認を行う検査。検査周期は、通勤列車の車両で 1~3 カ月程度、新幹線では 1 カ月程度の周期で実施され、所要時間は 1 日を要する。

### (c) 全般検査

車体を分解して各部品や装置の詳細な状態を確認する検査。検査周期は、通勤列車の車両で5～8年程度、新幹線では3年程度の周期で実施され、所要時間は10日以上を要する。

なお、上記は、電気で走行する「電車」に分類される車両についての記述である。燃料で走行する「機関車」や「ディーゼル車」については大枠では電車に準ずるが、定期検査や検査内容についてはそれぞれ特有の規定がある。また、検査周期については、2002年に法令改正があり、一部の機器については使用状態に応じた検査体系が認められるようになった。これに伴い、上述のような一定周期の検査のみではなく、使用状態に応じて検査を都度実施する「状態基準保全 (Condition Based Maintenance: CBM)」も一部の鉄道事業者で取り入れ始めている[15]。ただし、現時点では、上述の一定周期による検査体系が主流であるため、本研究では従来通りの検査体系を対象とする。車両割当計画作成では、上記の検査のうち「仕業検査」の検査日を計画する。「交番検査」と「全般検査」の検査日は、車両保守を管轄する別の計画（検修計画）で計画され、車両割当計画ではこれらの検査日は所与とし、所与の検査日を遵守するように作成する。

### 3.3. 車両運用整理

車両運用整理は、列車運行当日に、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ことをさす。列車の運行が乱れると終着駅での折返しが計画通りに実施できなくなるため行路の変更が必要となる。列車運行状況にあわせて変更された列車ダイヤに対して、終着駅への到着時刻を基に折返し列車に割当て編成を変更する。車両運用整理は、列車の運行が乱れた場合に行路を変更する作業であり、元々計画されていた車両運用への影響を最小化しつつ、実行可能な車両運用計画（行路と運行当日分の車両割当計画）を迅速に再作成することが求められる。

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を変更する。行路の変更においては、輸送サービスの観点と車両運用の観点の両観点からの考慮が必要となる。輸送サービスの観点では、同一編成に割振る列車の時刻と駅の整合性および列車ダイヤで定義された列車の車両数を満たすように考慮する。車両運用の観点では、一日の運行終了時点で編成を管轄する車両基地

に各編成をできるだけ戻すことや翌日の運行に影響を与えないように各車両基地または駅に滞泊させる編成の数を元の計画通りに戻すことが必要となる。

### 3.4. 本論文における研究対象の位置づけとシステム化の課題

#### 3.4.1. 研究対象の位置づけ

Fig. 6 に本研究が対象とする業務の位置づけを示す。本研究で対象とする車両割当計画と車両運用整理は運行当日～1か月間程度の短・中期計画を対象とした業務であり、日々の車両運用効率化に重要な業務である。

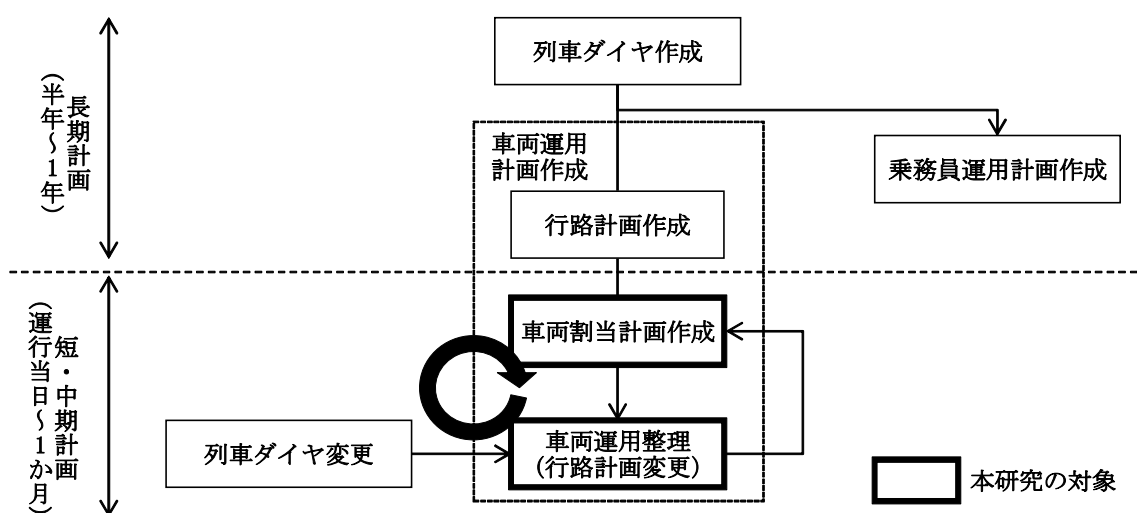


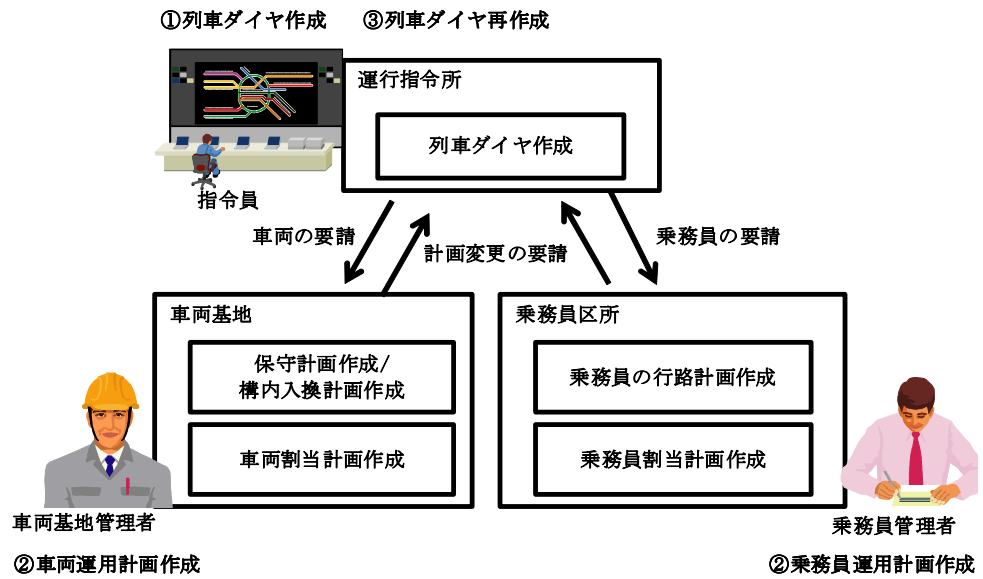
Fig. 6 車両運用計画業務における本研究対象の位置づけ

現状では、これまで人手で行われてきた業務をシステム化することが課題であり、今後数年はこの取組みが続くと考えられる。一方で、各業務のシステム連携により個別業務の最適化から全体最適化に移行する検討も欧州を中心に始められている[16]。日本国内においても個別業務のシステム化が一段落した後は全体最適化に進むと考えられ、車両運用においては列車ダイヤや検査計画、車両基地内の作業計画との連携機能の開発が今後の課題となる。

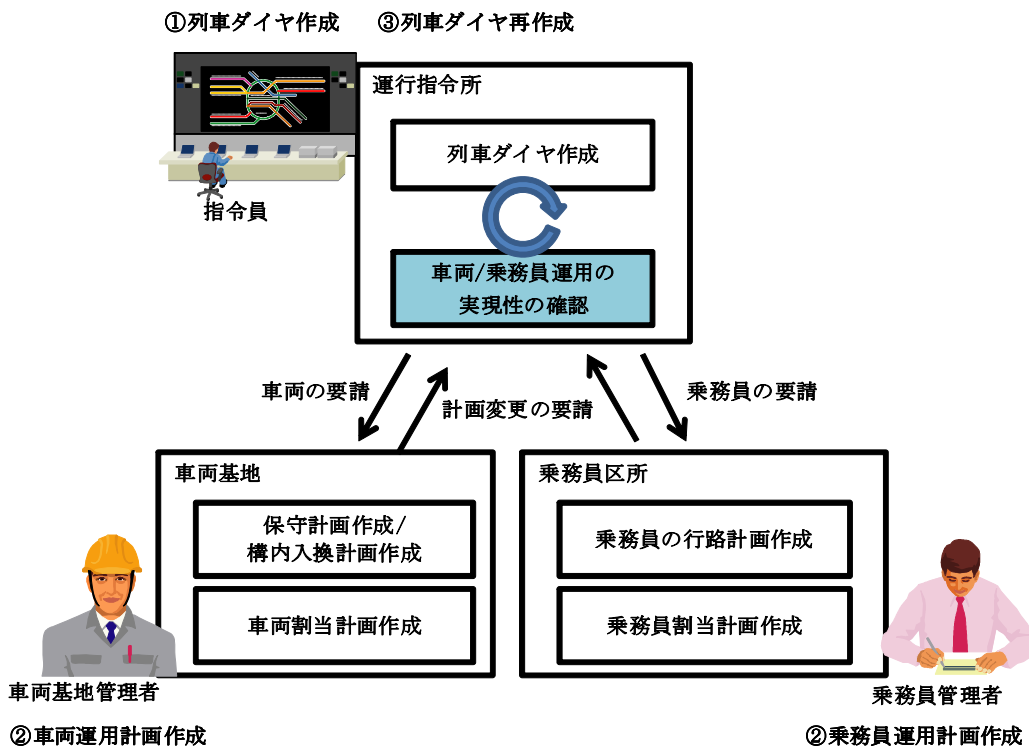
全体最適化に向けた研究として、車両基地内の作業計画を業務プロセスとしてモデル化してシミュレーションすることで車両運用整理を行う際に車両基地内の作業効率を考慮できるようにする検討[17]や車両運用整理と車両基地構内の作業計画を連携させるデータモデルを定義することで計画間の情報伝達を支援する

検討を進めている。Fig. 7に、検討中の全体最適化に向けた業務連携に関する取組みのイメージ図を示す。Fig. 7は、運行乱れ時の業務をモデル化した図であり、Fig. 7(a)と(b)それぞれに現状の業務プロセスと提案する業務プロセスを示している。Fig. 7(a)に示す通り、現状では、運行が乱れると運行指令所で列車ダイヤが変更され、その変更が車両基地と乗務員区所に伝達され、車両基地と乗務員区所それぞれで車両や乗務員の割当てを実施した後、割当てが実施できない場合に運行指令所に運行ダイヤの変更を申し入れて調整するという流れとなっている。実際には運行乱れ時は迅速な対応が求められるため、列車ダイヤと車両・乗務員との間の調整を行っている時間的余裕がなく、車両基地と乗務員区所では、列車ダイヤによって要求された変更を一部の制約を緩和してでも対応せざるを得ない。これにより、車両や乗務員の運用効率や現場の負担増加を招いている。Fig. 7(b)における提案では、列車ダイヤの作成時に、車両や乗務員といったリソース運用の実現性をシミュレーションにより検証するステップを実施することを提案している。これにより、車両基地や乗務員区所で車両・乗務員運用の計画を策定する前に、車両・乗務員運用の観点から列車ダイヤを評価することができ、輸送サービスの観点とリソース運用の観点の双方でバランスがとれた列車ダイヤの作成を支援することを狙っている。この提案は、車両・乗務員運用の観点から列車ダイヤを迅速に評価する手法の開発や作業効率への効果検証など解決すべき課題が残されており、引き続き研究開発が必要となっている。

以上に示した通り、本研究の最終的な目標は個別業務の連携による全体最適化であるが、個別業務についても十分にシステム化されていないのが現状である。このため本論文では、まずは個別業務のシステム化を進めるため、車両割当計画および車両運用整理それぞれについて計画作成を支援するアルゴリズムを提案する。



(a) 車両運用整理・乗務員運用整理の流れ（現状）



(b) 車両運用整理・乗務員運用整理の流れ（提案）

Fig. 7 全体最適化に向けた業務連携に関する提案

### 3.4.2. システム化の課題

#### (1) 車両割当計画

車両割当計画は、検査という車両の状態に依存する作業を扱うため予期しない対応が必要なケースが多々ある。このため、計画作成時に考慮する制約条件自体が変更されることも少なくない。例えば、車両状態に応じて修繕作業が急に必要な場合があり、このようなケースでは予定外の作業を追加する必要がある。また、定期検査を実施可能な行路は予め決められているが、検査周期を守れない場合は、決められた場所・タイミング以外でも特別に実施することもある。特に、運行乱れ後の再計画においては検査周期を守れないこともある。このような場合、所属する車両基地とは異なる車両基地に留置中の編成に対して検査作業員が出張していき、検査を実施するといった対応をとる。

制約条件を変えた計画作成を容易に行えるようにするため、システム化にあたっては、計画作成者とのインタラクティブ性を確保し、計画作成後に手動での修正を加えることができるようにすることが課題となる。インタラクティブ性の確保にあたっては、変更入力の容易性や計画作成結果の見易さといったユーザインタフェースの側面からの課題と計画作成に要する時間や変更が反映されるまでの時間といった応答性能の側面からの課題が挙げられる。

#### (2) 車両運用整理

車両運用整理は、運行当日の乱れ時を対象としているため、迅速な判断が求められる。加えて、全ての列車の要求に応える編成が用意できない場合は、列車の車両数の変更や場合によっては運休の要請を列車ダイヤの作成部署である運行指令所に申し入れる必要があり、車両運用の観点だけでなく輸送サービスの観点での判断も求められる。

更に、運行乱れ時には不確実な要素が多く、運行状況が刻一刻と変化するため列車ダイヤが逐次的に変更される。これにあわせて、車両運用整理でも、逐次的に変更される列車ダイヤに対して行路を逐次変更していく必要がある。例えば、車両故障の場合は、車両が走行可能であればすぐに車両交換の対策を実行することができるが、車両が走行不可能であると故障の原因調査からあたらねばならず、車両の走行再開までの時間が予測できない。また、気象による運行見合わせや速度制限、人身事故なども同様に運行再開可能となる時間を予測することができない。このように、運行乱れ時には少し先の運行状況でも予測できないケースが多

く、逐次的な計画変更が求められる。

以上より、車両運用整理のシステム化にあたっては、輸送サービス維持と車両運用効率の両方の観点を考慮しつつ、動的かつ迅速に行路変更を支援することが求められる。



## 第4章 関連研究

本章では、本研究が対象とする鉄道輸送サービスにおける車両運用計画を構成する機能のうち、主たる機能である車両割当計画と車両運用整理に関する従来研究を示す。更に、それらの計画に関連する一般的な最適化問題として経路最適化問題（巡回セールスマン問題）に関する研究を示す。なお、車両運用計画に密接に関わりがある列車ダイヤや乗務員運用計画に関する研究は包括的なサーベイ論文が出されているのでそちらを参照されたい[18]-[20]。

### 4.1. 車両割当計画に関する研究

車両割当計画の研究は、近年、海外を中心に取り組まれている。これらの研究は、対象とする業務形態の違いから、行路と車両割当を別々に扱う研究と同時に扱う研究とに大別できる。行路と車両割当を別々に扱う場合、複数日を跨る条件となる個々の編成の検査周期を考慮せずに行路を作成し、その後、検査周期を考慮して編成を割当てるといった具合に問題を分割して解くことができ、問題規模を抑えることができる。日本では、半月～1 か月のように計画作成対象の期間が長いケースが多く、実際の業務においても行路と車両割当を別々に作成している。一方、海外の研究では、行路と車両割当を同時に扱う研究が多く、適用可能であると想定される計画作成対象の期間が1日や数日単位と短くなっている。海外の研究で対象とされる路線は短距離であるため車両基地に戻しやすく、かつ車両基地にも余裕があるため、事前に入念な計画を立案しなくても検査を必要な時に実施しやすい環境にあるためと考えられる。

以降、海外で多く取り組まれている行路と車両割当を同時に扱う研究を示した後、行路と車両割当は別々に扱う、すなわち行路は所与として車両割当を作成する研究を示す。

行路と車両割当を同時に扱う場合、個々の列車への編成の割当てを考慮する必要がある。このため、折返し駅で使用する番線や列車の車両数といった個々の列車に起因する条件を考慮する研究[21]-[28]が取り組まれてきた。文献[21]-[24]は、駅で折返す際の番線間の移動（入換作業）を考慮するアルゴリズムを提案している。文献[21]は、車両割当計画と入換計画とをそれぞれ分枝限定法で解く統合ス

ケジューリングを提案している。文献[22]は、計画の頑健性を向上させるため、複雑な入換作業に対するペナルティと入換作業の運転士不足による遅延を組み込んだ定式化を提案している。文献[23]は、入換作業の複雑性をコストとして評価関数に組み込んだ定式化を提案している。文献[25]-[28]は、列車の車両数を考慮するアルゴリズムを提案している。文献[25]は、個々の列車の車両数の条件を考慮するため多品種フロー問題による定式化を提案している。文献[26]は、混合整数計画問題としての定式化と、ラグランジュ緩和と局所探索を用いたヒューリスティクスアルゴリズムを提案している。文献[27]は、多品種フロー問題をベースに併合時の車両位置を取り入れた定式化を提案している。Dantzing-Wolfe 分解を応用した分枝限定法を適用することで探索効率を向上させている。文献[28]は、編成を併合する際の位置関係を考慮して併合に要する時間をモデルに組み込んで定式化し、分枝限定法と列生成法を用いて解くアルゴリズムを提案している。

行路と車両割当を同時に扱いつつ定期検査を考慮する研究としては、列車に編成を割当てつつ定期検査の実施日を考慮する研究[29]-[32]が取り組まれてきた。文献[29]-[31]は、検査を実施するための作業時間を考慮した折返し時間や検査の実施日に関する制約を取り込んだ定式化と列生成法やラグランジュ緩和を用いた解法を提案している。これらの研究が検査の実施日は所与として扱うのに対して、文献[32]は、列車への編成割当てと検査の割当てを計画する手法を提案している。車両割当計画が、各編成への列車の割振りに関する制約と、列車に割当てる編成数や検査実施可能数といった編成間をまたがる制約に分類できるという特徴を利用し、各編成への列車の割振りを子問題とする列生成法を用いた解法を提案している。子問題は、効率的な最短経路探索アルゴリズムとして知られているベルマンフォード法を適用することで探索を効率化している。計5日間、1500列車の計画を作成するのに16分程度を要する。本研究は列車への編成の割当てだが、列車を行路と読み替えることで本研究が対象とする行路への編成の割当てにも応用可能であるが、計算時間の面で課題がある。

以上が行路と車両割当を同時に扱う研究であり、計画対象の期間は数日間～1週間程度の短期間を対象としている。

行路と車両割当を別々に扱う研究としては、長距離列車を対象とした研究がある[33]。文献[33]では、行路への編成の割当てを整数計画問題として定式化し、ルールベースのヒューリスティクスアルゴリズムを提案している。長距離列車では、

検査周期が走行日数よりも走行距離に依存している，すなわち編成へ割り振る行路の走行距離によっては次の定期検査までに走行できる日数の上限よりも先に走行距離の上限が到来してしまう．このことに着目し，走行日数と走行距離それぞれの上限ができるだけ同時期に到来するように，各編成に対して，次の定期検査までに残された日数と累積走行距離から日々に理想的な走行距離を割り出し，行路を優先順位づけするルールを定義することで解の探索を効率化している．30 編成，28 日間の計画に対して最適化ソルバでは実用的な時間内に解を出せないのに対して 1 秒程度で探索を可能としている．

以上をまとめると，1 週間以内の短い期間に対して行路と車両割当計画を同時に作成する問題を多品種フロー問題や混合整数問題として定式化し，ラグランジュ緩和とヒューリスティクス，混合整数計画ソルバ，分枝価格法（分枝限定法＋列生成法），分枝限定法，列生成法を用いて最適解を探索する手法が提案されている．1 ヶ月程度の比較的長い期間を対象とした研究としては，走行距離に基づく検査周期を対象としたルールベースアルゴリズムを用いてスケーラビリティを確保した提案がなされている．

本研究が対象とする半月～1 ヶ月程度の車両割当計画に対しては，短い期間を対象とした従来研究では計算時間の面で課題がある．一方，比較的長い期間を対象とした研究も少ないが報告されている．しかし，従来研究は長距離列車を対象としているため走行距離に着目して探索を効率化しているのに対して，本研究では，通勤列車のような短・中距離の列車を対象としている．このため走行距離よりも走行日数の方が支配的であり，従来研究をそのままでは適用できない．

また，海外の研究は最適化アルゴリズムとしての研究，すなわち自動で計画を作成することを目的とした研究がほとんどであり，インタラクティブな計画支援や状況に応じた条件変更などの実用化に向けた研究は少ない．

## 4.2. 車両運用整理に関する研究

車両運用整理は，当日の車両割当計画を考慮しつつ行路を変更する問題であり，技術的には行路の作成と類似点がある．国内外を含め，行路の作成に関する研究はある程度行われてきた[34]-[41]が，車両運用整理の研究は国内外を含めて取り組みが少ない．しかし，近年，前節で示した車両割当計画に関する研究の進展に伴い，いくつかの取り組みが報告されている．

車両割当計画に関する研究との違いは、運行乱れ時を対象としているため翌日の車両割当計画への影響を抑える必要がある点と、解の探索の許容時間が数分以内と非常に短い点である。従来研究においても、解の質をある程度確保しつつ短い探索時間で解を得るための研究が主に取り組まれている。

以降、車両運用整理に関係する研究について示す。まず、実際の運用における制約条件を考慮した研究を示した後、探索効率化の観点から特徴的な研究を示す。最後に、ここ数年の取組みとして、従来の制約条件や評価指標に加えて、乗客の経路選択モデルを取り込んだ評価を扱う取組みを示す。車両運用整理に関する近年の動向は包括的なサーベイ論文もあわせて参照されたい[43][44]。また、行路の事前計画に関わる研究は前述の車両割当計画に関する研究にて示した、行路と車両割当計画を同時に扱う研究を参照されたい。

運行当日に行われる作業に着目した研究として、運行当日に予定されている検査時刻の制約や折り返し駅による番線間の入換作業に関する制約を考慮する研究が報告されている[45]-[47]。文献[45]では、列車への編成の割当や検査時刻の制約、編成同士の結合・分割をそれぞれ混合整数計画問題としてモデル化することで検査の制約を考慮しながら車両運用計画を再作成する手法を提案している。文献[46][47]は、入換作業にペナルティを課すことで複雑な運用を抑えて車両運用計画を再作成する手法を提案している。

翌日の車両割当計画への影響に着目した研究として、運行終了時に各駅（または車両基地）に留め置く編成数を元の計画通りとする制約（編成滞泊数の制約）を考慮する研究がある[48]-[50]。文献[48]は、編成滞泊数の制約に加え、乗客数に対する座席数や分割併合も考慮した定式化を提案している。元の計画を部分的に変更しながら解を探索するグリーディーアルゴリズムと行路の候補を複数生成した後、解に含める行路の組合せを線形計画法で解く解法を提案している。文献[49]は、乗客数に対する座席数の制約と車両運用に関する制約を統合した定式化を用いることで山登り法による解法を改善する手法を提案している。文献[50]は、列車ダイヤの変更と車両運用計画の再作成を一つの混合整数計画モデルとして定式化し、バックトラック探索によって解を求める手法を提案している。

運行当日に行われる作業や翌日の車両割当計画への影響に加えて、輸送サービスへの影響にも着目した研究として、文献[51]がある。輸送サービスへの影響として「運休列車数」と「列車両数の不足」の最小化を主な評価項目とし、車両運

用効率として「走行距離」「入換作業数」「滞泊編成数の元計画からの変更」などの最小化を加えたモデルを提案している。汎用の整数計画ソルバーを用いて、中規模路線に対する数時間分の計画を平均 10 秒前後～5 分程度で解を得られている。

探索効率化に主眼をおいた研究として、最適解の求解アルゴリズムとヒューリスティクスをあわせる研究がなされている[52]-[56]。文献[52][53]は、再計画対象の時間帯を数時間幅に区切ることで問題サイズを小さくし、時間幅をずらしながら混合整数計画問題のソルバを用いて順次計画を再作成することで探索時間を短縮する手法を提案している。文献[54]は、各編成に割振る行路の候補を、元の計画を部分的に変更することで予め列挙し、行路候補の組合せを列生成法により探索することにより短時間で質の良い解を得る手法を提案している。文献[55]は、元の計画を部分的に変更することで暫定解を得た後、局所探索を用いてより良い解を探索する 2 段階のアプローチを提案している。文献[56]は、運休された列車を元に戻すように混合整数計画法を用いて車両運用計画を再作成する手法を提案している。

更に近年では、車両運用計画を再作成するアルゴリズムと与えられた列車ダイヤに対して乗車人数を推定する乗客流のシミュレータや乗客の行動モデルとを組み合わせることで乗客の観点から最適な車両運用計画を算出する方式が提案されている[57]-[61]。文献[57]-[59]は、乗客が列車・経路を選択する際の判断をモデル化して乗客数を予測し、予測した乗客数に対して十分な座席数を提供するように列車ダイヤの変更と車両運用計画の両方を再作成する手法を提案している。文献[60]は、離散シミュレーションによる混雑の予測とグリーディーアルゴリズムによる探索を組み合わせて、より混んでいる路線に他の路線の車両を割当てする手法を提案している。文献[61]は、乗客流のシミュレータと組み合わせることで各列車に割当てする車両数を最適化し、各乗客の遅延時分の総和が最も小さくなるような車両運用整理を算出する手法を提案している。

以上に示した通り、車両運用整理における従来研究では最適解を探索する研究がほとんどである。一方、本研究では、輸送サービス維持と車両運用効率の両方の観点について運行状況にあわせて考慮できるようにすることを旨としている。

このため、複数の解を提示し、比較しながら選択できるような手法が望ましい。従来研究では、このような観点からの提案はされておらず本研究の目的には不十分である。

また、前述した車両割当計画に関する研究と同様に、自動で計画を作成することを目的とした研究がほとんどであり、インタラクティブな計画支援や状況に応じた条件変更などの実用化に向けた研究は少ない。

#### 4.3. 車両運用計画に関連する計画技術

本節では、鉄道輸送サービス以外の分野における一般的な車両運用計画の最適化に関する研究を示す。

車両運用計画の研究は物流や航空業界を対象に研究されてきた。車両運用計画の特徴は、車両を割当てる対象となるタスクの実施時間と実施場所がタスクごとに異なるため、時空間の整合性つまり同一車両に割振るタスク同士の実施時間と実施場所の連続性を確保する必要がある点である。時空間の整合性に関する制約は、タスクをノードとし、タスク間の時空間に関する制約条件をリンクで表したネットワークモデルを用いて、各車両に割振るタスクをネットワークモデル上の経路で表すモデル化が一般的である。車両運用計画の作成は、車両を割当てるコストをリンクの重みとし、ネットワークモデルから最短経路を探索することに帰着させることができる。ネットワークモデルを用いた組合せ最適化問題の代表的な研究として、巡回セールスマン問題 (TSP) と呼ばれる問題の最適化の研究があり、混合整数計画問題としての定式化といくつかの解法が提案されている。以下、TSP の概要とその最適解探索の方法について述べる

##### (1) 巡回セールスマン問題 (TSP)

TSP は、セールスマンが、与えられた全ての都市を一度だけ訪問して出発地に戻ってくるための最も効率が良いルートを求める問題であり、古くから研究されてきた[62]。訪問対象の都市をノードとし、移動可能な都市間をリンクで結んだネットワークモデルでモデル化し、移動コストをリンクの重みとしてネットワークモデル上の最短経路を求める。解法としては、各ノードに至る最短経路 (部分解) を探索し、部分解を適宜再利用することで探索回数を抑える動的計画法 [63] や探索木を用いた探索と線形計画法による枝刈りを併用した分枝限定法、切除平面法、分枝カット法などの厳密解法[64]-[65]、遺伝的アルゴリズム[66]・

[69]やアントコロニー[70]-[72], タブーサーチ[73]などのメタヒューリスティクスによる解法, ニューラルネットワークによる解法[74]-[75]が提案されている。

TSP は, 物流業界や航空業界において, トラックや機体といった移動型のリソースの運用計画に応用されてきた。物流業界では, 荷物集配ルート of 計画に対して, 各トラックをセールスマンにみたてて TSP を応用したモデル化と解法に関する研究が行われている[76]。複数セールスマンを設定し, 集合分割問題としての定式化と列生成法やラグランジュ緩和を用いた解法が提案されている[78]。また, 複数の物流拠点が存在する場合は出発地が複数あるマルチデポの定式化も提案されている[80]。航空業界では, 機体に割振る航空便の計画に応用する研究が行われてきた[81]。物流のケースと異なる点としては, 機体の定期検査日の制約を扱う点である。航空便だけでなく, 定期検査もノードとして表すことで TSP を応用できるようにしている。解法は物流業界での手法と同様に厳密解法やメタヒューリスティクスが用いられる[82]-[84]。近年では, 運航乱れ時を対象に機体と乗務員, 旅客などを統合的に扱うアプローチの研究が報告されている[85][86]

以上で示した研究は検査日を考慮していないか, 考慮していても所定の検査日が指定されている問題を扱っている。鉄道輸送サービスにおける車両運用計画では, 検査周期を考慮して検査日を決定する必要があるため単純な TSP として扱うことができず, これらの研究をそのままでは適用できない。

## (2) TSP 問題の最適化に用いられる方法 (組合せ最適化)

TSP に応用される組合せ最適化技術について記す。組合せ最適化技術は, 最適性が保証された厳密解の探索を行う手法 (厳密解法) と最適解である保証はないが短時間で近似解を探索する手法 (近似解法) がある。車両運用計画では, 厳密解法は計算時間が長いため, 列車運行前の事前の計画作成を主な対象として応用が試みられている。近似解法は, 運行当日や計画作成者とのインタラクティブ性を求められる再計画を主な対象として応用が試みられている。

### 厳密解法

組み合わせ最適化問題は整数計画問題または混合整数計画問題として定式化できる問題がほとんどである。主な解法として, 分枝限定法やそれを改良した方法などがある。

近年, 計算機スペックの向上と商用の最適化ソルバの性能向上により, 数千~数万変数程度の整数計画問題や混合整数計画問題を商用の最適化ソルバを応用

することで解けるようになってきている[87]. 一方で, 実問題を対象とする場合は規模が大きくなるケースが多く, 商用の最適化ソルバーをそのまま適用しただけでは実用的な時間内に解を得ることはできない. このため, 問題構造を生かした定式化や解法の工夫により計算時間を抑えることが課題となる.

#### 近似解法 (局所探索法)

近似解を得るための解法として, ヒューリスティクスの応用が古くから研究されている. ヒューリスティクスを用いて暫定解の一部を変えることで近傍解を生成し, 近傍解のうち現在の解よりも良い解があればその近傍解を暫定解として探索を繰り返す山登り法がある. 前節に示した巡回セールスマン問題においては, 暫定解の巡回路に含まれる枝を入れ替えることで近傍解を生成する手法がよく用いられる. 入れ替える枝の数を 2 または 3 本に固定した 2-Opt 法や 3-Opt 法, 可変とした  $k$ -Opt 法がよく知られている. 近年では, 更なる改良として, 近傍解を生成する際に 2 つの暫定解で共有されていない枝を入れ替えることで未探索領域の探索を行う手法[88]も提案されている.

局所最適解から抜け出すための工夫を加えた手法として, タブーサーチがよく知られている. タブーサーチは, 暫定解と近傍解を入れ替える際に, 過去に実施した入れ替えを繰り返さないための制約 (タブーリスト) を設けることで局所最適解とその近傍の探索から抜け出す手法である. 欠点として, 基本的には一つの暫定解を起点とした探索であるため複数の局所最適解を跨ぐような大域的な探索を行うためには計算時間を要する点が挙げられる. 近年, この欠点への対処として, 良い解が類似の構造を有するという「近接最適性の原理」を用いて多起点の探索を可能とした手法[89]や局所最適解からの距離を定量的に定義することで局所最適解とその近傍領域から効率的に抜け出すための手法[90]が提案されている.

#### 近似解法 (メタヒューリスティクス)

メタヒューリスティクスを用いた組合せ問題の最適化は, 暫定解を起点にその近傍の探索を繰り返すことでより良い解を探索する手法である. 近傍探索を繰り返す際に, 局所最適解から抜け出すための工夫が課題となる.

焼きなまし法や遺伝的アルゴリズムは, 近傍解の探索において確率的な処理を入れることで局所最適解から抜け出す手法である. 焼きなまし法は, 近傍解の生成において確率  $P$  で改悪の解を認める手法である. 確率  $P$  は目的関数の変化量を基に算出され, 探索の初期段階では広範囲に探索し, 徐々に探索範囲を狭め



るような関数設計が一般的である。遺伝的アルゴリズムは、生物の遺伝子における世代交代を模倣して近傍解を生成する手法である。まず、候補解を記号で表し、遺伝子として見立てる。候補解の集合を親世代として、親世代に含まれる2つの候補解の一部を相互に入れ替え（交叉）、子世代の候補解を生成する。生成した子世代の候補解の集合を親世代として交叉の操作を繰り返すことで探索を行う。探索の途中、一定の確率で候補解の一部を変更し（突然変異）、それまで得られた暫定解よりも劣っている解は親世代の集合から除去する（淘汰）ことで探索の絞込みを行う。一定の確率で暫定解から離れる方向の探索を入れることで局所最適解から抜け出すことが可能である一方で、複数の探索を並行して実施することになるため計算に必要なメモリ量が膨大になるという問題点がある。近年では、多様な探索を効率的に実施するため、得られる解の類似度を基に多様性を算出して評価関数に組み込む手法[69]や両親から遠ざかる探索を多段階に実施する手法[91]が提案されている。近年では、局所最適解から抜け出すのみでなく、局所解探索と組み合わせることによって、解探索の効率化（高速化）を旨とした提案もされている。[92]は、暫定解の周辺を探索する局所探索をとるか暫定解から離れた大域的な探索をとるかを解の類似性を用いて判定する手法を提案している。[93]は、解空間における評価値の確率分布を推定する手法を用いて、近傍解を生成する際に複数の手法を実行し、確率的に有望な手法を選択することで探索効率化を図る手法を提案している。

## 第5章 検査周期を考慮した車両割当計画

車両割当計画のシステム化における課題は、既に第3章で述べた通り、計画作成条件や計画結果をユーザが変更しながら計画を作成できるような柔軟でインタラクティブ性の高い車両割当計画システムを構築することである。本章では、これを可能とするため、制約条件の特徴に応じて解の探索処理を2段階に分けて解くための問題の定式化(5.3)とヒューリスティクスを用いた計画作成時間が短い車両割当計画アルゴリズム(5.4)を提案する。

### 5.1. 計画目的と考慮すべき制約条件

#### (1) 計画目的

第3章にも示した通り、鉄道車両は、決められた走行距離または走行日数(検査周期)以内に1回以上の定期検査を実施するよう法律で定められている。車両割当計画は、編成に対して検査周期以内に定期検査を割当てつつ、行路に割当てる編成を決定する計画である。

定期検査が実施可能な車両基地は決められており、所要時間もかかる。このため、定期検査を実施可能な行路および実施可能なタイミング(運用開始前、後、途中で車両基地に戻ってきたときのいずれか)は限られており、これらは行路を計画する際に決定される。例えば、定期検査を実施可能な車両基地に午前中に入庫してそのまま留置する行路や夕方に出庫するような行路であれば定期検査を実施可能である。このように、定期検査の実施可否は編成に割振る行路に依存しているため、行路への編成の割当てと定期検査の割当ては同時に計画する必要がある。

また、定期検査の実施には人手がかかるため実施回数はできるだけ少ない方が望ましい。行路の作成においては、各行路の走行距離をできるだけ均等にすることや行路を事前に決められたパターン順に割振っていけば定期検査を実施可能な行路が検査周期以内に割振られるようにするなど検査周期を順守しやすいような工夫が施される。しかし、実際に運用すると、計画外の修繕や運行乱れなどにより走行距離や走行日数は崩れていくため事前のパターン通りには定期検査を実施できず、各編成の走行実績に応じてパターンを崩しながら定期検査を計画する必要がある。可能であれば検査周期の期限ぎりぎりに定期検査を実施していく方

が、定期検査数が少なく済むため効率がよいが、行路の割振り方によっては、検査周期の期限よりも早く定期検査を実施可能な行路が割振られ、次に定期検査を実施可能な行路まで待つと検査周期の期限を過ぎてしまうようなケースも起こり得る。したがって、行路計画上の制約条件をクリアしつつ、できるだけ検査周期ごとに定期検査を実施可能な行路が割振られるように編成の割当てを決めることで定期検査の実施回数を少なく抑えることが計画の目的となる。

## (2) 考慮すべき制約条件

### (a) 行路間の接続性

計画結果を実行可能なものにするために同一編成に割振る行路間の時間と場所の整合性を確保する必要がある。つまり、一日の運行終了時に編成が到着する車両基地（または駅）と翌日に出発する車両基地（または駅）とを同一にする必要がある。もし、これらが異なっている場合は回送列車を走らせる必要があり、運用コストがかかるため望ましくない。

### (b) 検査周期

前述 3.2 に示した通り、鉄道車両の検査は検査内容ごとに「仕業検査」「交番検査」「全般検査」があり、それぞれ異なる検査周期が決められている。車両割当計画ではこれらのうち「仕業検査」が計画対象であり、交番検査と全般検査は、車両工場で作成される別の計画（検査計画）で指定される。本研究では、仕業検査の検査周期は5日以内とする。以降、特に断りがなく「定期検査」という場合は仕業検査のことを指すものとする。

### (c) 検査作業のキャパシティ

定期検査にはスキルのある作業者と特定の設備が必要であるため、一日に実行可能な定期検査の数は限られている。本研究が対象とする鉄道事業者では、定期検査数の考慮を容易にするため定期検査が実施可能な行路が指定されている。

## 5.2. ネットワークモデルを用いた車両割当計画問題の記述

上述したように、車両割当計画には、定期検査の実施回数を抑えつつ各編成の走行実績と検査実績を基に決められた周期以内に定期検査を実施するように、行路の場所の整合性と検査作業のキャパシティを考慮しながら行路への編成の割当てと定期検査実施日を決定することが求められる。行路間の接続性は、一般的な

車両運用計画と同様に、ネットワークモデルで扱うことができる。一方、検査周期のような複数のノードをまたがる条件は扱うことができない。このため本研究では、ネットワークモデルを用いて行路間の接続性を考慮した解の探索ステップと、検査周期を考慮した解の探索ステップの 2 段階で車両割当計画を作成する。詳細は次節にて示す。

以降、一般的なネットワークモデルを用いて車両割当計画を表した車両割当計画ネットワークモデルについて示す。本ネットワークモデルでは、行路のようなタスクはノードで表し、接続性を確保できるノード間のみリンクで結ぶことで行路間の接続性を扱う。Fig. 8 に車両割当計画ネットワークモデルの例を示す。Fig. 8 において、ネットワークモデル上のノードは、計画対象の各日付における行路を表しており、同一の日付における行路を日付順に縦に並べている。複数の日付を飛ばして行路を割振ることはできないため、各ノードは隣接する日付のノードとのみリンクで結ばれる。各編成に割振る行路は、ネットワーク上の経路で表す。Fig. 8 の例では、編成 A に割振る行路は、9 月 1 日の行路 1 に相当するノードから始まり、9 月 2 日の行路 2、9 月 3 日の行路 3、9 月 4 日の行路 4 をそれぞれ表すノードを通る経路を探索することで作成される。

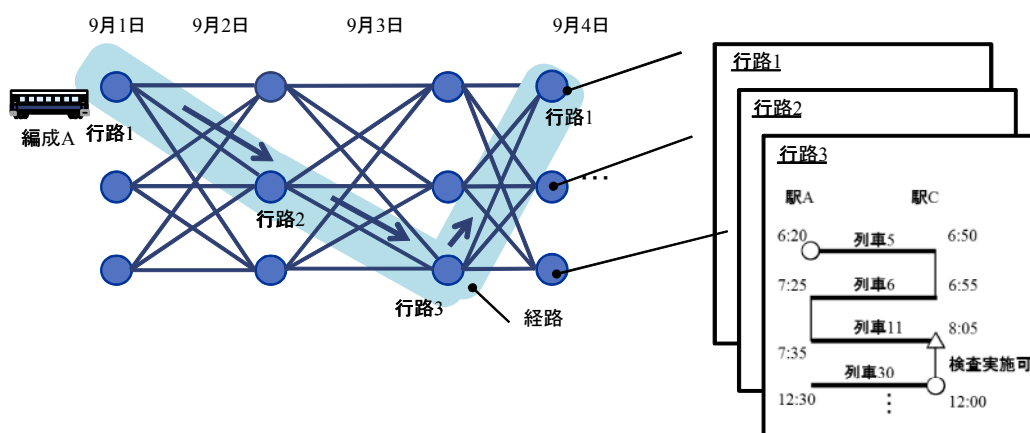


Fig. 8 車両割当計画ネットワークモデルの例

以下に車両割当計画ネットワークモデルの構成要素とその意味を示す。

**ノード：** 計画対象の日付における行路を表す。編成が車両基地に一日中留置される場合は、一日中留置する運用もノードとして表す。「行路の日付」「行路の出発車両基地（または駅）」「行路の到着車両基地（または駅）」「定期検査を実施可能かどうかのフラグ」の 4 つの属性をもつ。

リンク：4.1の(1)に示した行路間の接続性を表す。接続性を満たす行路間、つまり行路の日付が連続しており、かつ日付が一つ前の行路の運行終了駅と日付が翌日の行路の運行開始駅が同一である場合にリンクを設定する。各リンクは、行路の順序パターンに応じた重みを持つ。行路の順序パターンは、同一編成に割振る一連の行路であり、車両運用ノウハウに相当する。詳細は次章に示す。

経路：同一編成に割振る一連の行路を表す。

### 5.3. 数理最適化問題としての定式化

車両割当計画ネットワークモデルをベースに、車両割当計画最適化問題を整数計画問題として定式化する。

前述した通り、行路間の接続性のように2つのノード間の関係を制限する条件はネットワークモデルで扱うことができるが、検査周期のように複数のノードをまたがる関係は扱うことができない。ネットワークモデルを用いた制約条件の分析[94]においても検査周期の制約は「同一資源に対する作業のパターン」に分類でき、特定の条件（ここでは検査周期）を満たす作業（ここでは行路）の集合を予め定義する必要がある制約であることがわかる。そのため本研究では、ネットワークモデルを用いて行路の割振りの雛型（計画の雛型）を作成するステップと、作成した雛型に検査周期を考慮しながら定期検査を割当てするステップの2段階で車両割当計画を作成する。

以上を踏まえて本研究では、行路への編成の割当てと定期検査の実施日の割当てを分けて以下の決定変数を用いて定式化する。

行路への編成の割当てを表す変数：

この変数は、ネットワークモデルから経路の集合を求め、各経路への編成の割当てを表す0-1変数として定義される。後述の変数 $x_r$ 、 $z_{ju}$ および $p_{jn}$ が該当する。

定期検査の実施日の割当てを表す変数：

この変数は、定期検査の実施を表す0-1変数として定義される。各変数の値は、検査周期を考慮しつつ定期検査の実施数が最小となるような値を求める。後述の変数 $y_{kn}$ が該当する。

以降, 定式化に用いる要素を示す.

### パラメータ

$w_r$ : リンク  $r$  の重み

$c_k$ : 定期検査  $k$  の検査周期

$FC_{uk}$ : 編成  $u$  に対する定期検査  $k$  を実施する最初の周期. このパラメータは各編成の走行実績と検査実績に応じて異なる.

$PC_{kn}$ : 定期検査  $k$  をノード  $n$  で表される行路で実施する場合のコスト. 定期検査  $k$  がノード  $n$  で実施不可である場合は高いコストを設定する.

### 集合

$R$ : ネットワークモデルに含まれるリンクの集合

$N$ : ネットワークモデルに含まれるノードの集合

$I$ : 計画対象期間の日付の集合. 計画対象期間の初日を「0」とし, 日付順に通し番号とする.

$K$ : 定期検査の種類集合

$U$ : 編成の集合

$J$ : 経路の集合. この集合は前述の「行路への編成の割当てを表す変数」の結果を基に定義される. 経路の集合に含まれる経路の数は編成数に等しいものとする.

### 変数

$a_{kn} = \{0,1\}$ : 定期検査  $k$  がノード  $n$  で実施可能である場合は「1」とし, それ以外は「0」とする.

$t_{in} = \{0,1\}$ : ノード  $n$  が  $i$  番目の日付における行路を表す場合に「1」とし, それ以外は「0」とする.

$O_{rn} = \{0,1\}$ : ノード  $n$  がリンク  $r$  のリンク元である場合に「1」とし, それ以外は「0」とする.

$d_{rn} = \{0,1\}$ : ノード  $n$  がリンク  $r$  のリンク先である場合に「1」とし, それ

以外は「0」とする。

$s_n = \{0,1\}$ : ノード  $n$  が計画対象期間の初日における行路を表す場合に「1」とし、それ以外は「0」とする。

$e_n = \{0,1\}$ : ノード  $n$  が計画対象期間の最終日における行路を表す場合に「1」とし、それ以外は「0」とする。

### 決定変数

$x_r^j = \{0,1\}$ : リンク  $r$  を経路  $j$  の解に含める場合は「1」とし、それ以外は「0」とする。

$y_{kn} = \{0,1\}$ : 定期検査  $k$  をノード  $n$  に割当ててる場合に「1」とし、それ以外は「0」とする。

$z_{ju} = \{0,1\}$ : 編成  $u$  を経路  $j$  に割当ててる場合に「1」とし、それ以外は「0」とする。

$P_{jn} = \{0,1\}$ : ノード  $n$  が経路  $j$  に含まれる場合に「1」とし、それ以外は「0」とする。この値は  $x_r$  を用いて定義される（後述の式(5.5)を参照）。

車両割当計画問題の数理モデルを以下に示す。

### 評価関数

$$\min \sum_{n \in N} \sum_{k \in K} y_{kn} PC_{kn} \quad (5.1)$$

評価指標は定期検査のコストとする。

### 制約条件

$$\sum_{j \in J} x_r^j \leq 1 \quad \forall r \in R \quad (5.2)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{r \in R} (O_{rn} x_r^j + e_n d_{rn} x_r^j) = 1 \quad \forall n \in N, \forall j \in J \quad (5.3)$$

$$(\sum_{r \in R} d_{nr} x_r^j - \sum_{r \in R} O_{nr} x_r^j) \bar{e}_n \bar{s}_n = 0 \quad \forall n \in N, \forall j \in J \quad (5.4)$$

$$p_{jn} = \sum_{r \in R} x_r^j (O_{rn} + e_n d_{rn}) \quad \forall n \in N, \forall j \in J \quad (5.5)$$

$$\sum_{j \in J} z_{ju} = 1 \quad \forall u \in U \quad (5.6)$$

$$\sum_{u \in U} z_{ju} = 1 \quad \forall j \in J \quad (5.7)$$

$$\sum_{n \in N} z_{ju} s_n = 1 \quad \forall j \in J \quad (5.8)$$

$$\sum_{n \in N} z_{ju} e_n = 1 \quad \forall j \in J \quad (5.9)$$

$$\sum_i^{i+FC_{uk}} \sum_{n \in N} t_{in} p_{jn} y_{kn} - z_{ju} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall j \in J, \forall u \in U \quad (5.10)$$

$$\sum_i^{i+C_k} \sum_{n \in N} t_{in} p_{jn} y_{kn} \geq 1 \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall j \in J \quad (5.11)$$

式(5.2)は、同一リンクを含む経路を一つのみ制限する制約である。式(5.3)とあわせて、同一行路に複数の編成が割当てられないように制限する。

式(5.3)は行路の被覆に関する制約であり、同一行路を表すノードは一つの経路にのみ含まれるように制限する。リンクが解に含まれる場合、そのリンクのリンク元ノードも解に含まれることになる。ただし、計画対象期間の最終日のノードについては出力リンクがない。このため、式(5.3)はリンク元ノードの被覆数を制限すると共に、最終日のノードに接続するリンクについてはリンク先の被覆数を制限する。

式(5.4)は、計画対象期間の初日から最終日までを一つの経路でつなぐようにノードの入力リンクと出力リンクの数が等しくなるように制限する制約条件である。各ノードは必ず入力リンクと出力リンクを一つずつ持つ。ただし、計画作成期間の初日に相当するノードは入力リンクのみを持ち、最終日に相当するノードは出力リンクのみ持つため、式(5.4)の左項は計画対象期間の初日と最終日を除くため $\bar{s}_n$ および $\bar{e}_n$ によって乗算されている。

式(5.5)は、解として抽出された経路に含まれるノードを定義している。

式(5.6)は、編成の重複に関する制約であり、一つの編成を割当てる経路は一つのみ制限する。

式(5.7)は、経路の重複に関する制約であり、一つの経路に割当てる編成は一



つのみを制限する。

式 (5.8) と (5.9) は、計画対象期間の初日と最終日におけるノードの被覆に関する制約である。各経路が初日から始まって最終日で終わるように、各経路が初日と最終日それぞれノードを一つずつ含むように制限する。

前述5.1(2)(b)に示した定期検査の検査周期に関する制約条件は、式 (5.10) と (5.11) で表される。式 (5.10) は初回の検査周期に関する制約である。初回の検査周期は各編成の走行実績と検査実績に依存するため編成ごとに異なる。編成ごとに検査周期のパラメータを変えた式とする。割当て編成の識別は決定変数  $z_{ju}$  にて行う。式 (5.11) は全ての検査周期を考慮するための制約であり、は編成によらず一律の検査周期を扱う。

前述5.1(2)(c)にて示した定期検査のキャパシティは変数  $a_{km}$  で表される。本研究で対象とする鉄道事業者では、定期検査の実施可否は検査作業のキャパシティを考慮した上で行路ごとに決められているため、各行路における定期検査の実施可否を遵守することで検査作業のキャパシティを考慮することができる。定期検査の実施可否は車両基地への入庫時刻と出庫時刻によって決まるため行路を作成する際に同時に決定される。

## 5.4. 最適化アルゴリズム

### 5.4.1. 概要

本節では、ヒューリスティクスを用いて車両割当計画を短い計算時間で解くためのアルゴリズムを提案する。

車両割当計画の作成にあたって計算時間を要する要因として、検査周期に関する制約が挙げられる。検査周期の制約は制約数が多く計算時間がかかる要因となる。検査周期は、前回の検査を実施した日を起点に計算されるが、複数の周期を含む期間を計画作成対象とする場合は検査の実施日が事前に決定していない。このため、いずれの日を起点としても検査周期を満たすように、解の候補全てについて計画対象日全てを起点に制約条件を定義する必要があり、制約条件数が膨大となる。検査周期に関する制約の扱い方を工夫し、解探索時間を実用的な時間内におさめることが課題となる。

本研究では、検査を実施可能な行路が決まっていることを利用し、検査周期以内に検査を実施可能な行路の順序パターンを、計画作成者のノウハウを用いて予

め定義することで検査周期の制約を満たす計画を短時間で算出することを目指す。

前節で示した制約条件のうち検査周期に関する条件である式 (5.10) および (5.11) は非線形であり、短時間で解を得るための汎用的なアルゴリズムは見つかっておらず最適化ソルバの適用は困難と考えられる。短時間で解を得るためのアルゴリズムとしてメタヒューリスティクスの適用も考えられるが、メタヒューリスティクスは検査周期のような特殊な制約条件は陽に扱うことができず、探索過程における評価関数として扱うこととなる。このため制約条件の特徴に応じた探索の効率化は期待できず、メタヒューリスティクスを用いるメリットは少ないと考えられる。以上より、本論文では、検査周期の制約を少ない計算量で扱うため、計画作成者のノウハウを取り込んだネットワークモデルを用いることで解の探索を効率化したヒューリスティクスを提案する。提案手法は、検査周期を満たす行路の順序をパターンとして予め生成しておき、行路の順序パターンの組み合わせと部分的な変更により各編成に対する計画を作成する。

提案アルゴリズムの概要をFig. 9に示す。提案アルゴリズムでは、以下の2フェーズによってネットワークモデルを利用する。

#### Phase 1 : 計画の雛形の作成

ネットワークモデルから制約式(5.2)~(5.9)を満たす経路を選択することで各編成の計画の雛形を作成する。ここでの計画の雛形とは行路への編成の割当てを定義したデータであり、検査周期を考慮していないため「雛形」と呼ぶ。次フェーズであるPhase 2の成功率を高めるため、行路の順序パターンを反映したネットワークモデルを用いる。

#### Phase 2 : 検査の設定

Phase 1で選択した経路に、検査周期の制約である式(5.10) (5.11)を満たすように検査を割当てる。本フェーズの結果が車両割当計画となる。

検査周期の違反が生じる場合は、行路の順序を変更する必要があるため、ネットワークモデルを介してPhase 1に戻って計画の雛形を修正する。このとき、全てを作成し直すのではなく、作成済みの計画を部分的に変更しながら探索できるよ

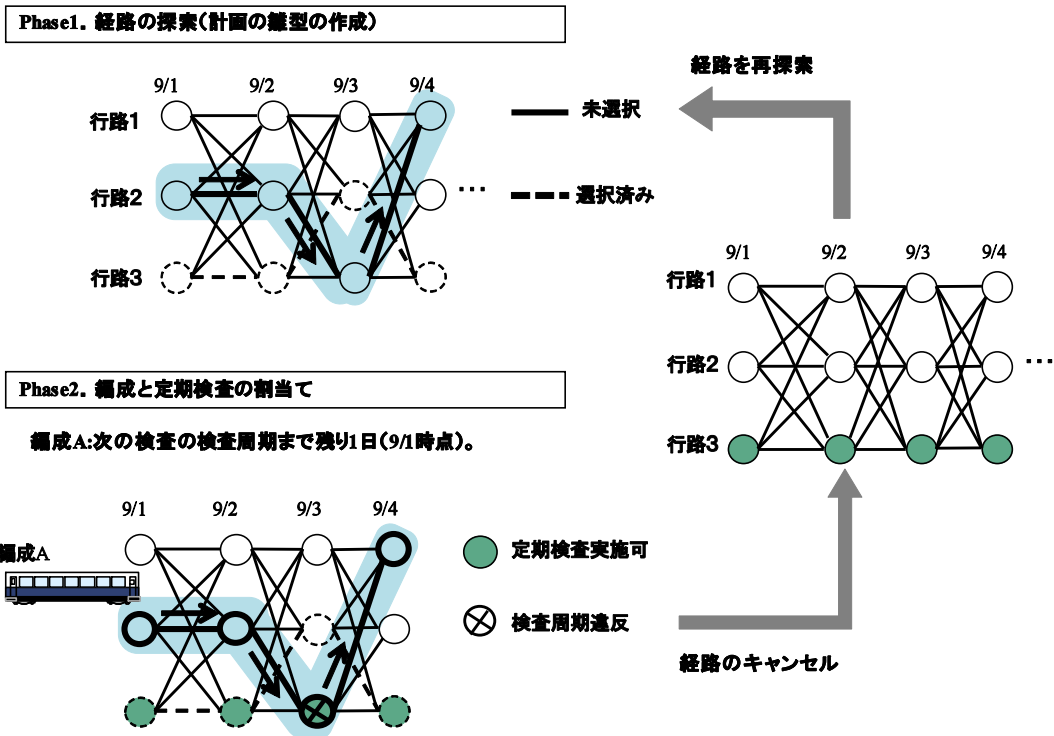


Fig. 9 提案手法の概要

うに、変更対象の行路を基にPhase 1の探索対象となるネットワークモデルを編集する。

以降、提案アルゴリズムの基本フローと各処理の詳細を示す。

#### 5.4.2. 基本フロー

Fig. 10 に提案手法の基本フローを示す。まず始めに、行路の順序パターンを作成し (Step 0), 行路の順序パターンを反映したネットワークモデルを作成する (Step 1). その後、部分解である個々の編成の計画を一つ一つ作成しながら解を探索し (Steps 1-5), より良い解を得るために、処理する編成の順序をランダムに変えながら Steps 1-5 を上限時間まで繰り返す (Step 6). 各ステップの詳細は次節以降 (5.4.3, 5.4.4, 5.4.5) に示す。

以降、行路の順序パターンの作成 (Step 0) を示した後、Phase 1 と Phase 2 についてそれぞれ示す。

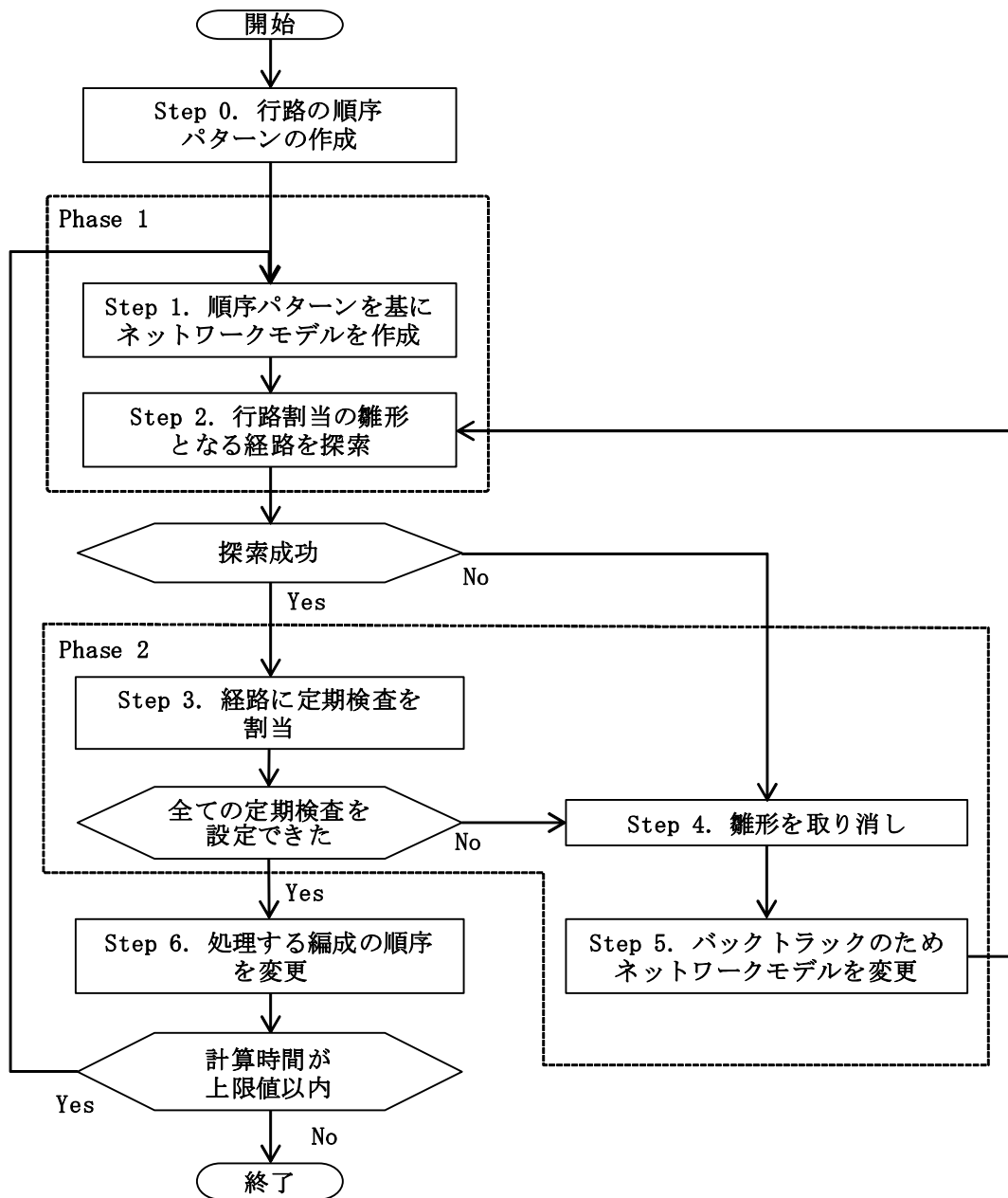


Fig. 10 基本フロー

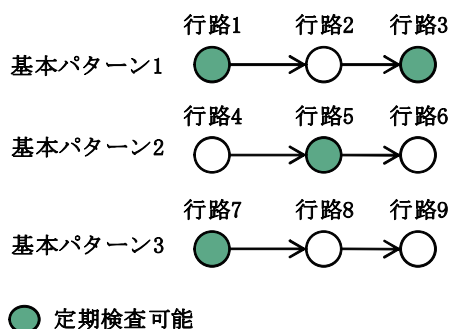
### 5.4.3. 行路の順序パターンの作成

基本フローの Step0 では行路の順序パターンを作成する。運用ノウハウである運用パターンを部分的に入れ替えることで行路の順序パターンを作成する。運用パターンは、検査周期以内に検査を実施可能な行路が一つ以上現れるように作成された一連の行路の並び順であり、行路を計画するときに同時に作成される。

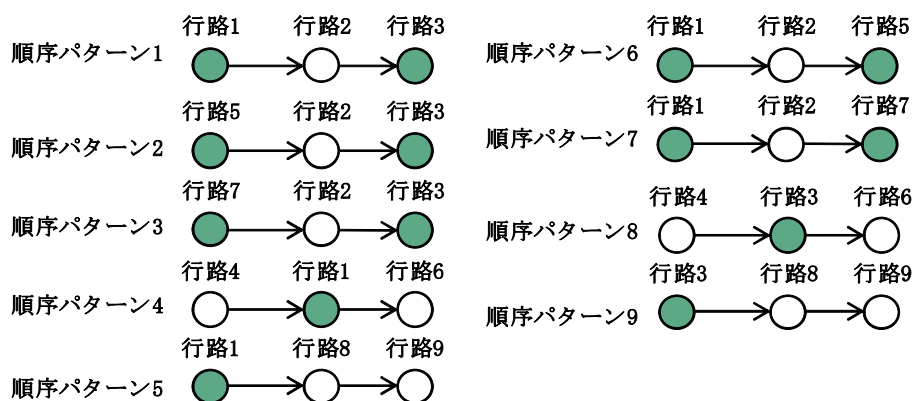
通常、行路の番号を「1」から順に並べた順序で規定されている。これを利用して、検査周期単位に行路の順序パターンを作成する。具体的には、以下の手順で作成する。

- (1) 運用パターンを検査周期ごとに区切ることでパターンの最小単位（基本パターン）を作成する。
- (2) 基本パターン同士で検査を実施可能な行路を入れ替えることで検査周期を順守した行路の順序パターンを作成する。ただし、各行路の開始・終了場所が異なる場合は整合性がとれる場合のみ入れ替えるものとする。

Fig. 11 に例を示す。この例では、検査周期は3日間とする。行路1から9を順に並べたパターンが運用パターンであり、行路1, 3, 5, 7で検査が可能である。まず、行路1～3, 4～6, 7～9をそれぞれ基本パターン1, 2, 3とする。基



(a) 基本パターンの例



(b) 行路の順序パターンの例

Fig. 11 パターンの例

本パターン1の行路1と5, 行路1と7, 行路3と5, 3と7をそれぞれ入れ替えた行路の並びをそれぞれ行路の順序パターンとする。同様に, 基本パターン2と3についても検査可能な行路を入れ替えることで行路の順序パターンを作成する。

#### 5.4.4. 計画の雛型の作成 (Phase 1)

Phase 1では, Step 0で作成した行路の順序パターンを用いて各編成の雛型を作成する。前述5.3の車両割当ネットワークモデルのリンクのうち, 行路の順序パターンを表すリンクについて重みを小さく設定し, 最短経路を求めることで行路の順序パターンをできるだけ多く含んだ計画を作成する (step 1)。

以下のリンクについて重みを小さく設定する。

- (a) 行路の順序パターンに含まれる行路の順序と同じ順序を表すリンク。
- (b) 基本パターンの最後と最初の行路を表すノード。Fig. 11の例では, 行路3と5, 行路3と7, 行路4と1などが該当する。

最短経路はダイクストラ法[95]を用いて, 式(5.2)～(5.9)を満たすように各編成の計画分だけ順次探索する (step 2)。ダイクストラ法は, ネットワークモデルから最短経路を求めるための汎用的なアルゴリズムである。部分解を記憶しながら探索し, 探索過程が同一となる場合は記憶した部分解を用いて探索を省略することで計算時間を短縮する。式(5.2)と(5.3)で表されるノードやリンクの被覆数に関する制約のように編成間をまたがる制約は, 各編成の計画を作成するたびにネットワークモデルを変更することで考慮する。具体的には, 一つの経路が探索されたら, その経路に含まれるノードとリンクをネットワークモデルから削除する。これにより, 同じノードとリンクが複数の経路に含まれないようにする。

#### 5.4.5. 定期検査の割当て (Phase 2)

Phase 2では, 式(5.10)と(5.11)を考慮して検査周期を遵守するように定期検査を割当て (Step 3), 必要に応じて計画の雛型を変更する (Steps 4-5)。以降, 詳細を示す。

##### Step 3: 定期検査の割当て

Step 2で探索した各経路に対して, 計画対象期間の初日から最終日までを順に走査し, 定期検査を実施可能なノードに定期検査を設定する。定期検査数を最

小化するため、できるだけ検査周期に至る直前のノードに定期検査を設定する。検査周期の違反が解消できない場合に行路の順序すなわち計画の雛型の変更が必要であるため、他の編成の計画をキャンセルして Step 1 の計画の雛型の作成を再実行する。他の編成の計画に含まれる行路を再度選択可能なようにネットワークモデルを生成し、雛型の作成と同じステップを実行する（バックトラック）。

#### Step 4 : 計画のキャンセル

Step 2 において作成した部分解からキャンセルする編成を選択する。編成の選択基準は、検査周期の違反が生じている定期検査を実施可能な行路を割当てられている編成やキャンセルされた回数が少ない（一定値以内）の編成から優先的に選択する。

#### Step 5 : ネットワークモデルの変更

Step 4 で選択した編成に割振られている経路をキャンセルする。すなわち、経路に含まれるノードとリンクをネットワークモデルに追加する。これにより、これらのノードとリンクが他の編成の計画として選択できるようにする。この後、Step 2 を実行することで一旦作成した計画の雛型を部分的に変更しながら解を探索する。

### 5.5. 提案方式の実験評価

#### 5.5.1. プログラム実装

数値評価を実施するため、提案アルゴリズムを実装したプロトタイプシステムを作成した。プロトタイプシステムの構築環境は以下の通りとした。

開発言語 : C++

開発環境 : Visual Studio 2008

計算機 : Pentium 4 (3.2 GHz and 2 GB)

Operating System : Windows 7, 32bit

提案アルゴリズムの擬似コードを Fig. 12 に示す。

**Repeat** 以下の処理を繰り返す

**Initialize each variables.** 各変数の初期化

**Generate order patterns.** 順序パターンの生成

**Sort all train units randomly, and set the train units to a targeted set.**  
編成をランダムにソートし、処理対象の集合に設定

**For each train unit in the targeted set**

処理対象の集合に含まれる編成一つ一つに対して以下の処理を実施

**Create a network model.** ネットワークモデルの作成

**Search the shortest path from the network model.**

ネットワークモデルから最短経路を探索

**Generate a partial schedule for the targeted train unit from the path.**

最短経路を基に対象編成の部分計画を生成

**If there is any canceled train unit,**

キャンセルされた編成がある場合

**add the canceled train unit to the targeted set.**

キャンセルされた編成を処理対象の集合へ追加

**next train unit** 次の編成の処理へ

**For each train unit in the targeted set**

処理対象の集合に含まれる編成一つ一つに対して以下の処理を実施

**Set inspections to the partial schedule for the targeted train unit by verifying whether there is any violation of inspection cycles in the targeted partial schedule.**

検査違反がないか確認しながら処理対象の編成の部分計画に検査を設定

**If there is any violation left,** 検査違反が残る場合

**Select one train unit for canceled, and add the train unit to the targeted set.**

キャンセルする編成を一つ選択肢、処理対象の集合に追加

**Add all nodes and links include the partial schedule for the selected train unit to the network model.**

選択した編成の部分計画に含まれるノードとリンクをネットワークモデルに追加

**next train unit** 次の編成の処理へ

**until processing time is under the limited time.**

処理時間が上限に至るまで繰り返す

Fig. 12 車両割当計画アルゴリズムの擬似コード

### 5.5.2. 評価方法

提案手法を実装したプロトタイプシステムを用いて、解の信頼性の観点から評価する。提案手法の有効性を解の質や処理時間、提案手法による探索結果と整数計画や非線形計画を扱うことができる最適化ソルバ Gurobi[96]を用いた探索結果を比較する。Gurobi は、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商用ソルバである。

評価観点は以下の通り。



### (1) 最適性

定期検査を実施するためのコスト．式 (5.1) を用いて算出する．検査を実施不可能な行路に対して検査を割当てた場合のペナルティは「10.0」とし，それ以外は「1.0」とする．

### (2) 信頼性

提案手法はランダムに処理順序を変更しながら解を探索する手法であるため，実行する度に得られる解が異なる．実用にあたっては，処理の回数（または時間）の目安が必要であるため，一定の処理回数（または時間）内に一定の解が得られること（解の信頼性）が求められる．解の信頼性を評価するため，処理の上限回数を一定として提案手法を複数回実行し，得られた解の評価値の差分を検証する．

### (3) スケーラビリティ

解の探索に要した時間によって評価する．提案手法の場合は，Fig. 10 に示した全ての処理を実施する際に要した時間とする．

## 5.5.3. 実験データ

テストデータには実運用のデータを用いる．テストデータと 5.3 で示した各パラメータ，すなわちリンクの重み，検査周期について Table 1 に示す．また，各テストデータの問題規模を Table 2 に示す．

Table 1 データセットとパラメータ

#### (a) データセット

データ No.	車両基地の規模	編成数	計画対象日数[日]	指定検査の割合[%]
Case 1	小規模	10	16	1.88
Case 2	大規模	67	28	4.53

#### (b) パラメータ

検査周期[日]	リンクの重み	
	行路の順序パターンに含まれる場合	行路の順序パターンに含まれない場合
5	1	1000

Table 2 問題規模

	決定変数 x	決定変数 y	決定変数 z	決定変数 p	変数の総数
Case 1	480	160	100	1600	2340
Case 2	15596	1876	4489	125692	147653

#### 5.5.4. 実験結果

##### (1) 車両割当計画結果の出力

Case 1 における実験結果の例として、プロトタイプシステムの出力画面を Fig. 13 に示す。また、Fig. 13 に示した結果を作成する際に生成したネットワークモデルの一部を Fig. 14 に示す。なお、Gurobi では実用的な計算時間（24 時間以内）に解を得ることができなかつたため、ここでは提案手法についての結果のみを示す。

Fig. 13 の画面では、「編成名称」の列が編成を一意に特定する編成 ID を表し、「4/1」～「4/16」は日付を表している。各セルに記載された数字は、該当日に該当編成を割当ててる行路の ID である。例えば、1 行 3 列目のセルは、編成 ID 「0」の編成は、日付「4/1」に行路 ID 「10」に割当ててることを意味する。各セルの丸で囲われた「仕」の記号は仕業検査を表す。なお、行路 ID が「-（ハイフン）」となっている場合は予備車両として車両基地に留め置いておくことを意味する。灰色の記号は、該当行路が仕業検査を実施可能な行路であることを意味し、黒色の記号は、計画作成の結果、仕業検査を割当てた行路を意味する。

まず、仕業検査の割当結果を確認する。Fig. 13 に示した編成 ID 「0」の編成の計画では、仕業検査を実施可能な運用が日付「4/2」に割当てられた後、日付「4/5」～「4/8」の日付でも連続して割当てられている。これら全ての日付について仕業検査を実施すると所定の検査周期（5 日間）よりも短い周期で検査を実施することになり効率が悪い。そこで提案手法では、日付「4/2」に検査を割当てた後、検査周期が切れる直前の日付「4/7」にのみ仕業検査を割当てている。一方、編成 ID 「1」の計画では、仕業検査を実施可能な運用が日付「4/4」で割当てられた後、日付「4/8」と「4/10」といった具合に間隔を空けて割当てられている。もし、日付「4/4」で検査を実施した後、日付「4/10」まで待つと検査周期が切れてしまうため、提案手法では検査周期よりも 1 日短い日付「4/8」で検査を実施する

ように割当を実施している。その他の編成においても同様に、仕業検査が可能な行路が連続して割当てられていてもできるだけ検査周期が切れる直前に仕業検査を割当てるとような計画となっていることがみてとれる。

次に、行路の順序パターンを確認する。今回の実験データでは、行路 ID 「1」～「7」が基本的な行路であり、この番号通りの順序が行路の順序パターンに相当する。ただし、日付「4/1」と「4/2」のみ臨時の行路が入っており、これらは行路 ID 「10」として表す。行路の順序パターンに相当する箇所は、図中の行路 ID を表す番号の下に下線で記した。例えば、編成 ID 「0」の日付「4/2」～「4/4」は、順序の行路パターン通りに行路 ID 「1」～「3」が割当てられている。全体的に行路の順序パターン通りに割当てられているが、部分的にパターンが途切れている。例えば、日付 ID 「4/5」や「4/6」、「4/8」などにおいてパターンが崩れている。これは、仕業検査を実施可能な行路が「1」と「4」となっており、行路の順序パターン通りに割当てると検査周期よりも余裕をもった周期で検査を実施することになっているためと考えられる。本研究では、目的を定期検査コスト最小化としているため、このようなケースでは、できるだけ検査周期の直前に仕業検査を割当てるとように、行路の順序パターンを部分的に崩しながら計画を作成する結果となる。

最後に、ネットワークモデルについて示す。Fig. 14 は、編成 ID 「0」の計画を作成する際に用いたネットワークモデルの一部である。編成 ID 「0」は、日付 ID 「4/1」と「4/2」それぞれにおいて行路 ID 「10」および「1」のノードに割当てられる。このとき、編成 ID 「0」をリンク元とするリンクはいずれも行路順序パターンに含まれていないため重みは等しい値が設定される。このため、これらの割当は、行路の ID 順に選択される。同様に、日付 ID 「4/2」と「4/3」を結ぶリンクについても、行路 ID 「10」をリンク元とするリンクはいずれも行路順序パターンに含まれていないため行路の ID 順に選択される。日付 ID 「4/2」と「4/3」を結ぶリンクについては、行路 ID 「1」をリンク元とするリンクのうち行路 ID 「1」と「2」を結ぶリンクが行路順序パターンに含まれるため、他のリンクよりも小さな重みが設定される。そのため、このリンクが選択される。このように、行路順序パターンに含まれるリンクを優先的に選択しながら各編成の計画が作成される。

編成名称	4/1	4/2	4/3	4/4	4/5	4/6	4/7	4/8	4/9	4/10	4/11	4/12	4/13	4/14	4/15	4/16
0	10	1 ⊕	2	3	- ⊕	- ⊕	- ⊕	- ⊕	-	-	-	-	-	-	-	-
1	2	6	7	1 ⊕	7	6	7	1	7	1 ⊕	2	3	-	-	-	-
2	5	10	-	-	4	5	6	2	1	2	6	7	1	2	3	-
3	1 ⊕	7	1 ⊕	2	6	2	1	7	6	7	3	4	5	1	2	1
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	3	4 ⊕	5	6	2	1	2	6	2	3	4	5	6	7	1	2
6	7	3	4	5	1 ⊕	7	3	4	5	6	7	1	7	6	7	6
7	4 ⊕	5	6	7	3	-	4	5	3	4	5	6	2	3	4	5
8	6	2	3	-	-	4	5	3	-	5	1	2	3	4	5	3
9	- ⊕	- ⊕	-	4 ⊕	5	3	-	-	-	-	-	-	4	5	6	7

Fig. 13 車両割当計画結果の例

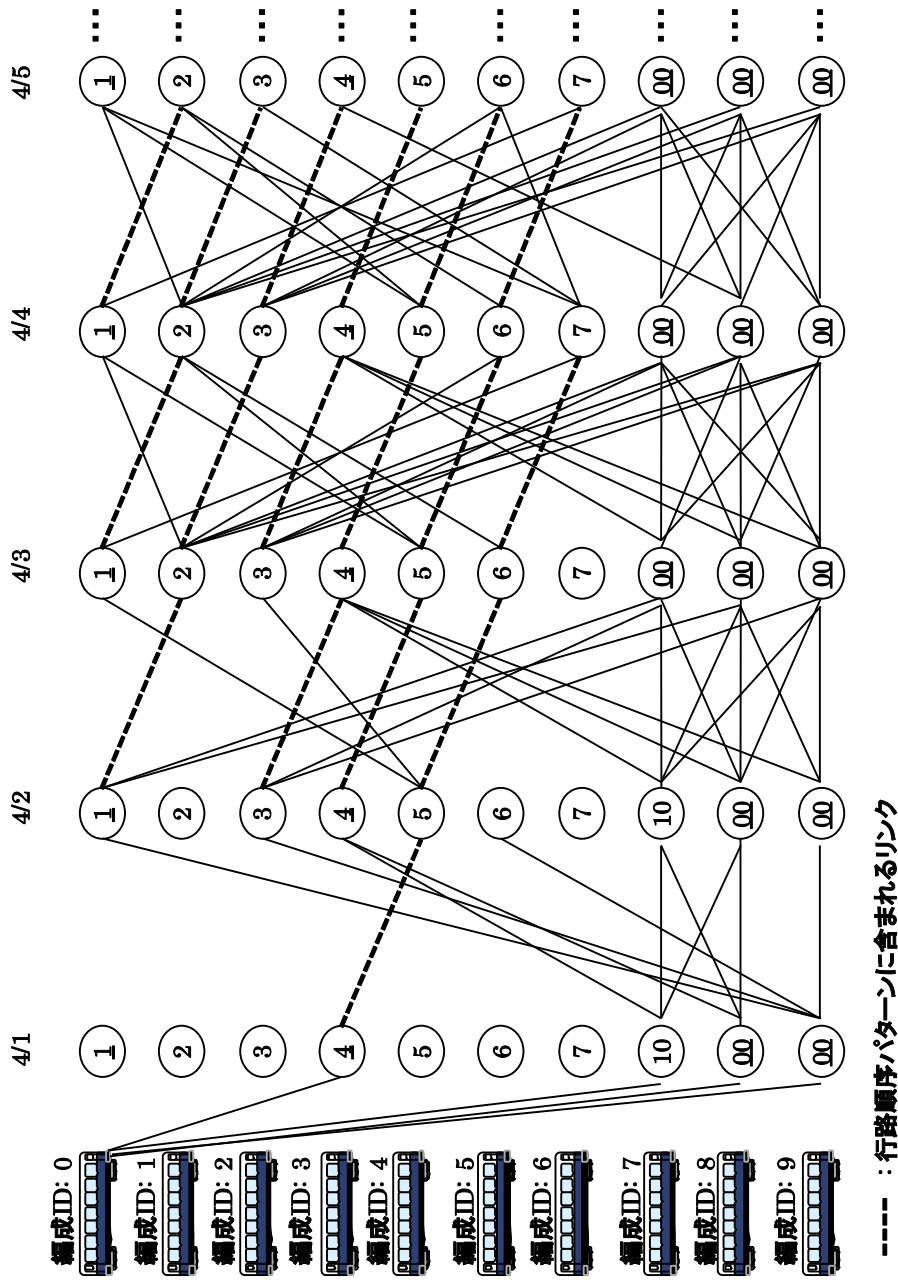


Fig. 14 車両割当計画結果の例 (ネットワークモデルによる表現)

## (2) 最適性および信頼性についての結果

小規模データ Case 1 の実験結果について Gurobi との比較を Table 3 に示す。提案手法についてはランダム性があるため、10 回実行した結果の平均値を示している。各試行における計算時間の上限は 6 時間とした。また、Gurobi は実用的な時間内すなわち 24 時間以内に探索を終えることができなかったため、暫定解を示している。

Table 3 最適性および安定性に関する評価結果 (Case 1)

	検査コスト	検査コストの分散値	計算時間[秒]	検査実施可能日に 設定された検査数 (括弧内:割合 [%])
提案手法	32.5	0.25	3066.0	32.5 (100.0)
Gurobi	50 ※暫定解	—	≥ 86400	—

提案手法の方がより良い解すなわち検査コストが 35.0%低い解を得ることができている。提案手法の結果を詳しくみると、全ての検査について、検査を実行可能な日に設定することができている。これは、イレギュラーな対応がないことを意味しており実行しやすい計画であるといえる。なお、Gurobi については暫定解であるため結果の詳細が得られないため、検査が実行可能な日に計画されているかどうかは不明である。

解の信頼性については、提案手法は検査コストの分散値 0.25 で解を得られており、安定的に解を得ることができているといえる。また、Fig. 12 に、Case 1 における探索の収束過程を示す。Gurobi では、探索の初期に検査コストが 50 となる解を得た後はそれ以上良い解が得られていない。一方、提案手法では、最良解に近い解すなわち検査コストが最良解の 106.3%となる解を最初の 1 分以内に得ることができおり、かつ最良解を 1 時間程度で得ることができている。これにより、小規模データについては実用的な時間内に十分に収束計算できると考えられる。人手による計画作成は半日～数日間を要しており、これと比較しても十分に実用的な時間内で収束しているといえる。

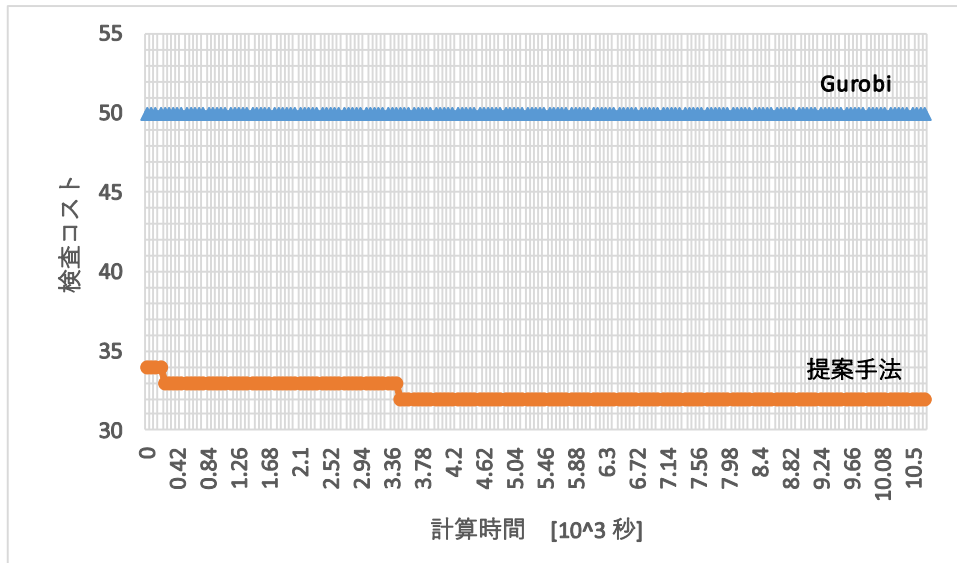


Fig. 15 解の探索過程 (Case 1)

(3) 求解のスケラビリティ

提案手法の Case 2 における結果をに示す。

Table 4 スケラビリティに関する評価結果 (Case 2)

	検査コスト	検査コストの分散値	計算時間 [秒]	検査実施可能日に 設定された検査数 (括弧内：割合 [%])
提案手法	609.1	3.08	55946.4	429.1 (96.0)

Case 2 は Case 1 よりも問題規模が約 63 倍だが、計算時間は約 18.3 倍に抑えられている。問題規模 (決定変数の総数  $n$ ) に対する計算時間としては  $n \log n$  よりはるかに小さい値で抑えられている。

実問題における Case 2 の規模は、5.5.3 に示した通り、計画対象の編成数と日数両方において大規模であるが、計算時間は 15.5 時間程度でおさまっている。人手による作成は数日を要しており、これを鑑みると実際の計算時間としても実用に耐えうると考えられる。しかし、人手による手動修正と自動作成を組み合わせたシステムとして考えると、インタラクティブ性を確保するための応答時間としては更に短時間での計算が求められる。

以上より、実用的な時間内に解を得られるかどうかという観点でのスケーラビリティは確保できているといえる。一方で、人とインタラクションを想定した応答時間の観点からは更なる改良が必要となる。

## 5.6. 本章の総括

### 5.6.1. 結論

計画作成者が考慮している基本的な計画作成ノウハウ（行路の順序パターン）をネットワークモデルの操作として表し、このパターンを用いて作成した計画の雛型を部分的に変更しながら計画を作成することで探索効率を向上させる手法を提案した。計画の雛型の変更に際しては、各編成の計画間をまたがるグローバル制約をネットワークモデルの操作によって扱うことで、解法を変更せずにバックトラックを可能とした。これにより、実用的な時間内に解を得ることを可能とした。

また、制約条件や計画作成ノウハウをネットワークモデルで表現したことで、システムの内部処理を知らない計画作成者であってもネットワークモデルを介してこれらを柔軟に変更することができる考える。

実運用データを用いた比較的小規模な計画問題（決定変数：2340）に対する数値実験により、提案手法の最適性と信頼性を確認した。具体的には、6時間程度で解を得られており、実用的な時間内（24時間以内）に汎用ソルバで得られた結果と比較して検査コストが35.0%低い解を得られることを確認した。また、信頼性については、実験データの70%において最良解を得られ、残り30%については、最悪値は検査コストが最良解の3.1%増加しているが、検査回数で表すと1回分の増加であり許容範囲内であると考ええる。以上より、実用に耐えうることを確認した。

実運用データを用いた比較的大きな計画問題（決定変数：147653）に対する数値実験により、スケーラビリティを確認した。大規模データの計算時間は約15時間程度であり、問題規模（決定変数の総数  $n$ ）に対する計算時間としては  $n \log n$  よりはるかに小さい値で抑えられている。以上より、スケーラビリティの面でも実用的であることを確認した。

### 5.6.2. 今後の課題

実用化にあたっては以下が課題である。



## (1) 再計画機能の実現

計画作成者による手動変更を受けた再計画機能として、一度作成した解からの変更を抑えた解の探索処理を実現する必要がある。車両割当計画を算出するアルゴリズムを示したが、実用にあたっては車両管理者による計画結果の判断と手動修正が必要である。例えば、定期検査を本来は実施しない行路に検査を設定した場合は、該当日に臨時で検査を追加できるかどうかを作業員の手配や必要部品などの観点から検討が必要である。臨時検査の追加が不可能な場合は、提案システムが算出した計画を車両管理者が手動で変更し、提案システムが手動変更内容を反映した上で計画を再作成する必要がある。臨時の検査の設定がない場合でも、割当て行路のパターンや優先的に検査を設定する行路など暗黙的なノウハウが存在する場合もあり、そのような場合も車両管理者による手動修正と提案システムによる再作成が必要となる。

以上より、実用化に向けたシステムでは、車両割当計画を算出する機能のみでなく、手動修正を受け付けるインターフェースと手動修正箇所は固定した上で再作成する機能が必要となる。再作成にあたっては、計画作成者が複数回の試行錯誤を繰り返すような場合、より短時間での計算が必要となる。これらについて、機能実現と性能確保（計算時間）双方の観点から、提案手法のネットワークモデルを応用できると考える。具体的には、再作成を実施する際に、初期解からの変更内容を提案手法のネットワークモデルに反映した後、提案したアルゴリズムで解を探索することで、手動修正内容を反映した上で短時間で計画を再作成することができる。

## (2) 適切な計算時間上限値の検証

処理順序をランダムに変更しながら探索するため、最良解を得られる計算時間が探索ごとに異なる。対象の車両基地における計算時間の適切な上限値は、複数のテストケースを用いて実験を実施し、決定する必要がある。

## 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

車両運用整理の概要とシステム化の課題は、第3章で述べた通り、列車運行状況や車両状態にあわせて動的かつ迅速に計画変更が可能な車両運用整理システムを構築することである。本章では、これを可能とするために、車両運用整理で考慮すべき制約条件のネットワークモデルを用いた記述 (6.2)、および数理最適化問題としての車両運用整理最適化問題の定式化 (6.3)、更に、制約充足解探索ヒューリスティクスを用いた計画作成時間が短い制約充足解探索アルゴリズム (6.4) を提案する。

### 6.1. 計画目的と考慮すべき制約条件

#### (1) 計画目標

第3章に示した通り、車両運用整理は、運行が乱れた際に行路と行路への編成の割当を変更する業務である。車両運用のみでなく輸送サービスの観点も考慮しつつ短時間で再作成する必要がある。車両運用整理では、列車の運休や行き先変更、時刻変更といった輸送サービスに関する項目は変更対象ではないが、列車の車両数については割当ての編成によって変更となる場合がある。特に、分割併合を行っている路線では分割併合する編成や実施駅を変更する場合があります。その場合は列車の車両数が変更となる。車両不足を補うためや効率的な車両運用のために分割併合の変更が必要なケースでは輸送サービスと車両運用どちらの観点を重視するか状況に応じた判断が必要となる。

本章では、その時々々の運行状況や運用実績を鑑みて解の評価観点を換えることができるように複数の解を提示する車両運用整理アルゴリズムを提案する。実際の業務では、全ての要件を同時に満たすことができないケースも多いため、その時々々の運行状況や運用実績を鑑みて緩和する条件を判断しながら行路を変更している。例えば、運行の乱れが昼ごろに発生した場合は輸送サービスへの影響を抑えることが重視され、滞泊駅や滞泊編成数のように翌日の運行を考慮するための制約条件は考慮せず、運行の乱れが落ち着いた後に考慮する。運行の乱れが夜間に発生した場合は、滞泊駅や滞泊編成数を無視すると後で考慮することが難しいためできるだけ始めから考慮する。このように、その時々々の状況に応じて判断基準を換えることができるよう、本研究では、最適解ではなく代替案を含めた複数の解を

提示する機能を提供することを目ざす。

## (2) 編成行路計画の作成において考慮すべき制約条件

### (a) 接続条件

折返し前と折返し後の列車間で場所と時刻のつながりに矛盾がないこと。同様に、編成の運用開始場所（運用開始後の編成の場合は現在割当てられている列車の終着駅）と始めに割当てする列車（運用開始後の編成の場合は次に割当てする列車）の間に場所のつながりに矛盾がないこと。実行可能な編成行路計画とするために最低限必要な条件である。

### (b) 割当ての網羅性の条件

全列車が最低一つの編成に割当てられているという条件である。この条件に違反が生じた場合、列車を運行できないため運休が発生する。

### (c) 列車両数の条件

列車ダイヤでは、旅客数の見込みに応じて各列車の車両数が決められている。この列車の車両数を元の計画から変更しないという条件である。この条件に違反して列車の車両数が元の計画よりも減った場合、列車は運行可能だが、輸送可能な人員が元の計画から変わるため旅客数に対して十分な輸送サービスが提供できない可能性が生じる。一方、元の計画よりも増えた場合、輸送サービスに影響はないが、無駄に多い輸送力を提供することになるため車両運用の効率が低下する。

### (d) 滞泊駅の条件

滞泊駅を元の計画から変更しないという条件である。滞泊駅とは、一日の運行が終了した時点で編成が留置される駅である。

### (e) 滞泊編成数の条件

滞泊編成数を元の計画から変更しないという条件である。滞泊編成数とは、同一の滞泊駅に留置される編成の数である。滞泊駅の条件が守られていれば本条件は必然的に守られるが、滞泊駅の条件を緩和する際に考慮が必要となる。な

お、滞泊編成数が元の計画から変更されると、翌日の始発列車に割当てする編成が不足する可能性がある。このため本条件に違反が生じた場合は、回送列車を追加して元の場所に編成を戻すか、翌日の列車を運休するといった対応が必要となる。

#### (f) 分割併合の条件

行き先が複数ある路線や旅客数が途中で大きく変化するような路線では、複数の編成を併合して走らせ、途中駅で分割する（以降、このような運用を分割併合と呼ぶ）。分割併合を実施するためには特殊な設備や人員配置が必要であるため、実施可能な駅に限られる。分割併合の実施には、「分割併合を実施可能な駅であること」という条件を満たす必要がある。

## 6.2. 車両運用整理問題のネットワークモデル記述

本章で提案する編成行路計画リスケジューリング手法では、対象となる編成行路計画において前述に示した条件をネットワークモデルで表す。これにより、ネットワークモデルの変更操作により、リスケジューリングに必要な制約充足解の探索および制約緩和を行うアプローチを採用している。なお、本論文での制約緩和では、解が出ない場合に、ネットワークモデルに対する変更操作を一部追加または変更することで制約充足解を得られるようにする。

前章で用いた一般的な車両運用計画で用いられるネットワークモデルでは、タスク（ここでは列車）はノードとして表すが、運用開始/終了場所やリソース（ここでは編成）を明示的に表していない。このため、「滞泊駅の条件」や「滞泊編成数の条件」のように編成の割当てと運用開始/終了場所に関わる条件を扱うことができない。本研究では、ネットワークモデルの変更操作で制約緩和を行うことができるよう、車両運用制約モデルを提案する。

以降、提案する車両運用制約モデルについて記す。

各列車をノードで表し、接続条件が成立する列車間をリンクでつないだネットワークモデルを用い、列車の運行状況と前述 2 章に示した「接続条件」「滞泊駅の条件」「列車両数の条件」を記述する。以降、このネットワークモデルを「車両運用制約モデル」と呼ぶ。なお、「割当ての網羅性の条件」「滞泊編成数の条件」「分割併合の条件」は車両運用制約モデルの操作条件（すなわち、解探索時に考慮す

る制約条件)として記述する。

Fig. 16 に、車両運用制約モデルの例を示す。一つの行路は、車両運用制約モデル中の巡回路として表現する。例えば、Fig. 24 の例に示した編成 A の行路は、「編成 A」⇒「列車 1」⇒「列車 3」⇒「列車 6」⇒「終端 A」⇒「編成 A」という巡回路で表現する。車両運用制約モデルでは、同一編成に割当て可能な列車は全てリンクで接続されるため複数の巡回路が存在する。

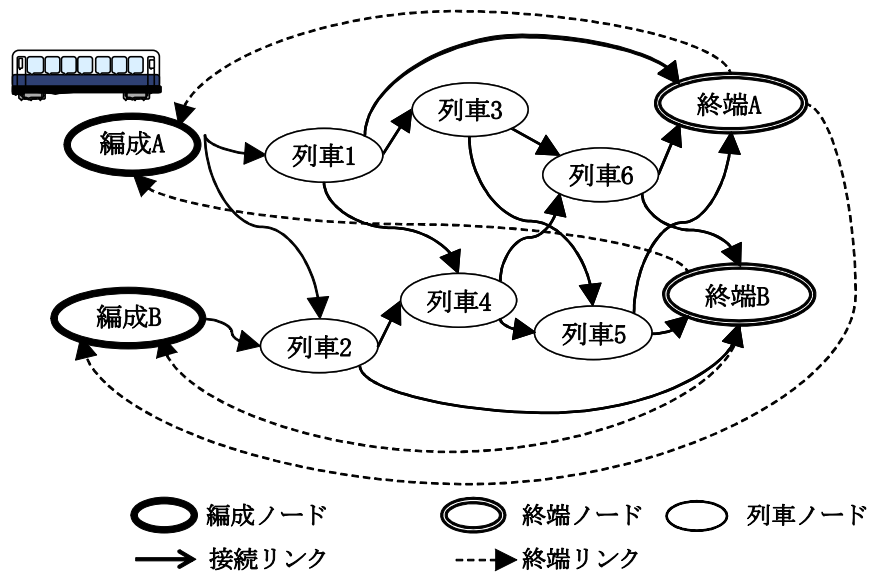


Fig. 16 車両運用制約モデル (分割併合なし)

本論文では、車両運用制約モデルから制約条件を満たす巡回路の組合せを探索することで編成行路計画を作成する。詳細は、後述 5.4.2 に記す。

#### 車両運用制約モデルの構成要素

##### (a) 編成ノード：

編成一つ一つをそれぞれ一つのノードとして表す。運用開始駅、形式、車両数、所定の滞泊駅を属性としてもつ。

##### (b) 終端ノード：

運用の終了を表すノード。編成の数だけ生成し、各編成の所定の滞泊駅を属性としてもつ。

(c) 列車ノード：

列車を表すノード。列車番号，始発駅，終着駅，始発時刻，到着時刻，形式，車両数を属性としてもつ。また，複数の編成を併合して割当ててる列車の場合は，併合する編成の数だけ列車ノードを生成する。

(d) 併合列車ノード：

併合列車の候補を表す。併合する列車の列車ノードと同じ属性をもつ。本ノードを経路に含む編成は他の編成と分割併合されることを意味する。列車ノードから併合列車ノードにリンクする場合は併合を表し，併合列車ノードから列車ノードにリンクする場合は分割を表す。Fig. 15 に，併合列車ノードを用いた分割併合の例を示す。図中の編成 B は，列車 2 として走行した後，編成 A と併合して列車 3 および列車 4 として走行した後に分割され，列車 5 として走行して運用を終了する。本ノードは，列車の車両数を元の計画から変更する場合に設定する。詳細は，後述 6.4.3 の制約緩和にて記す。

(e) 終端リンク：

終端ノードと編成ノードをつなぐリンク。滞泊駅の状態を表す。滞泊駅を元の計画通りに必ず戻したい場合は滞泊駅が同じ編成ノードと終端ノードとの間にのみ設定する。滞泊駅を元の計画から変更してもよい場合は，全終端ノードと全編成ノードとの間に設定する。

(f) 接続リンク：

接続条件と滞泊編成数の条件を表すリンク。以下のノード間に設定する。

- ①接続条件を満たす列車ノード（または併合列車ノード）間。
- ②接続条件を満たす編成ノードと列車ノード（または併合列車ノード）間。つまり，編成の運用開始駅と列車の始発駅が同じとなる列車ノード（または併合列車ノード）と編成ノード間。運用開始後の編成の場合は現在割当てられている列車の列車ノード（または併合列車ノード）と編成ノード間。
- ③列車の終着駅と終端ノードの滞泊駅が同じとなる列車ノード（または併合列車ノード）と終端ノード間。

### 6.3. 数理最適化問題としての定式化

車両割当計画の整数計画問題としての定式化を示す。列車運行乱れ状況を把握した上で編成行路計画をリスケジューリングする問題は前述に示した車両運用制約モデルから各編成の行路となる巡回路を探索する問題として定式化できる。本論文では、元の計画からの変更数を抑えて計画を再作成するため、元の計画を少しずつ変更した巡回路を予め列挙し、列挙した巡回路の組合せを選択する手法をとる（詳細は後述 6.4.1 を参照）。このため、予め列挙した巡回路の候補を、「解に含める巡回路」と「それ以外」とに分ける集合分割問題として定式化する。

#### 決定変数

$x_j = \{0,1\}$  : 巡回路  $j$  が解に含まれる場合は「1」とし、それ以外は「0」とする

#### 定数

$a_{ij} = \{0,1\}$  : ノード  $i$  が巡回路  $j$  に含まれる場合は「1」とし、それ以外は「0」とする

$Tr_i = \{0,1\}$  : ノード  $i$  が併合列車以外を表す場合は「1」、それ以外は「0」

$N$  : 編成の総数

$R$  : 解候補の巡回路の集合

$M$  : 全てのノードの集合

#### 評価関数

編成行路計画を再作成した結果、「分割併合」「折返し前後の列車の組合せ」「滞泊編成数」が変更される可能性がある。これらの内容について以下の 2 目的で評価する。

##### (1) 輸送サービス（輸送力）の観点

分割併合の変更に伴う輸送力低下の割合を評価する（式 (6.1)）。輸送力は、列車ダイヤに含まれる列車の車両数の総和によって算出する。再計画の結果、元の計画の輸送力以上の輸送力が確保されていれば輸送サー

ビスの低下は生じないため，式 (6.1) は，再計画結果の輸送力が元の計画の輸送力以上となる場合は「0」となるような算出式としている。

$$O_1 = \frac{|o_1'| - o_1'}{2}$$

$$O_1' = \left( \frac{\sum_{j \in R} V_j \sum_{i \in Mtr} a_{ij} x_i}{V} - 1 \right) \times 100.0 \quad (6.1)$$

$V$  : 元の計画における列車の車両数の総和

$V_j$  : 巡回路  $j$  に該当する編成の車両数

$Mtr$  : 列車ノードおよび併合列車ノードの集合

## (2) 車両運用の観点

車両運用効率を評価する。車両運用効率は、「分割併合」「折返し前後の列車の組合せ」「滞泊編成数」それぞれの変更が車両運用効率に与える影響の大きさを考慮し，元の計画からの差分を重み付け和として評価する（式 (6.2)）。本論文で用いた重みは評価実験の章にて示す（後述 6.5.2 を参照）。各項目の値域は，「分割併合」と「折返し前後の組合せ」の変更数は 0～列車本数分のオーダー，「滞泊編成数」の変更数は 0～編成数となる。各項目を重み付けした値の値域が大幅に異なる場合には正規化が必要となる。

$$O_2 = w_1 \sum_{j \in R} p_j x_j$$

$$+ w_2 \sum_{j \in R} \sum_{i \in M} a_{ij} x_j (1 - Tr_i)$$

$$+ w_3 \sum_{e \in St} \left| \sum_{j \in R} b_{je} x_j - N_e \right| \quad (6.2)$$

$w_1$  : 折返し前後の列車の組合せ変更に対する重み

$w_2$  : 分割併合の変更に対する重み

$w_3$  : 滞泊編成数の変更に対する重み

$p_j$  : 巡回路  $j$  含まれる折返し前後の列車の組合せ変更数

$b_{je} = \{0,1\}$  : 巡回路  $j$  が駅  $e$  で終わる場合は「1」，それ以外は「0」

$N_e$  : 元計画において駅  $e$  に対峙する編成の数



St : 駅の集合

解の算出においては、上述の2つの評価指標の和により解を評価する。評価関数(6.1)の値域は0.0~100.0となり、評価関数(6.2)の値域は列車本数、編成本数および各項目の重み付けに依存する。評価関数(6.1)と(6.2)の値域が大幅に異なる場合は正規化が必要となる。

$$\begin{aligned} & \text{minimize } O, \\ & O = \alpha_1 O_1 + \alpha_2 O_2 \end{aligned} \tag{6.3}$$

### 制約条件

解となる巡回路集合において、各ノードは多くても一つの巡回路に含まれる、かつ併合列車ノード以外は必ず一つの巡回路に含まれる。前述の「割当ての網羅性の条件」「列車両数の条件」が該当する。また、全ての終端ノードが必ず被覆されることで元の計画と同じ数の編成が滞泊駅に戻るようになるため、前述の「滞泊編成数の条件」も該当する。

$$\sum_{i \in M} \sum_{j \in R} a_{ij} x_j \leq |M| \tag{6.4}$$

$$\sum_{i \in M} Tr_i(\sum_{j \in R} a_{ij} x_j) = Ns \tag{6.5}$$

Ns : 併合列車以外を表すノードの数

連続して併合する列車(連続併合候補)は同一の巡回路に含める。なお、連続併合候補は、前述6.1(2)(f)の「分割併合の条件」を満たし、かつ接続条件または滞泊編成数の条件に違反が生じる区間に設定する(詳細は6.4.3を参照)。

$$\sum_{j \in R} d_{jk} x_j - c_{rk} x_r \geq 0 \tag{6.6}$$

$d_{jk} = \{0,1\}$  : 巡回路  $j$  が連続併合候補  $k$  の列車ノードを全て含む場合は「1」、それ以外は「0」

$c_{rk} = \{0,1\}$  : 巡回路  $r$  が連続併合候補  $k$  の併合列車ノードを全て含む場

合は「1」、それ以外は「0」

また、所定の編成数の分だけ計画を作成するように以下の条件を考慮する。

解となる巡回路は編成数に等しい。

$$\sum_{j \in R} x_j = N \quad (6.7)$$

#### 6.4. 制約充足解探索アルゴリズム

前述 6.3 に示した問題の解を探索することで編成行路計画リスケジュール案（変更案）を作成する。探索効率化のため、人手による計画作成で行われている常套手段を用いたヒューリスティクスを提案する。評価関数に示した2つの観点を考慮するが、どちらの観点到に重きを置くかは、乗客数や時間帯、車両状況など様々な情報を総合的に判断する必要があり機械的に決定できない。このため、それぞれの観点到から制約条件を緩和することで観点到が異なる解を算出する。

処理を Fig. 17 に示す。

##### (1) 巡回路の列挙 (Step 1)

元の計画を変更することで予め候補となる巡回路を列挙する。元の計画の変更にあたっては、人手による計画変更で用いられる常套手段を車両運用制約モデルに対する操作としてモデル化することで効率的に巡回路を列挙する。

##### (2) 巡回路の組合せの探索 (Step 2~7)

予め列挙した巡回路から解となる組合せを探索する。探索にあたっては、後のステップである制約緩和による制約条件の変更を反映しやすくするため、制約プログラミング[97]を用いたバックトラックサーチを用いる。制約プログラミングは、制約条件を宣言的に記述する記述手法と、変数の値を決めるごとに制約条件を充足するように他の未決定の変数の値の範囲（ドメイン）を絞り込む仕組み（制約伝播）から構成される解法であり、制約条件そのものの変更を柔軟に解法に反映することができる。

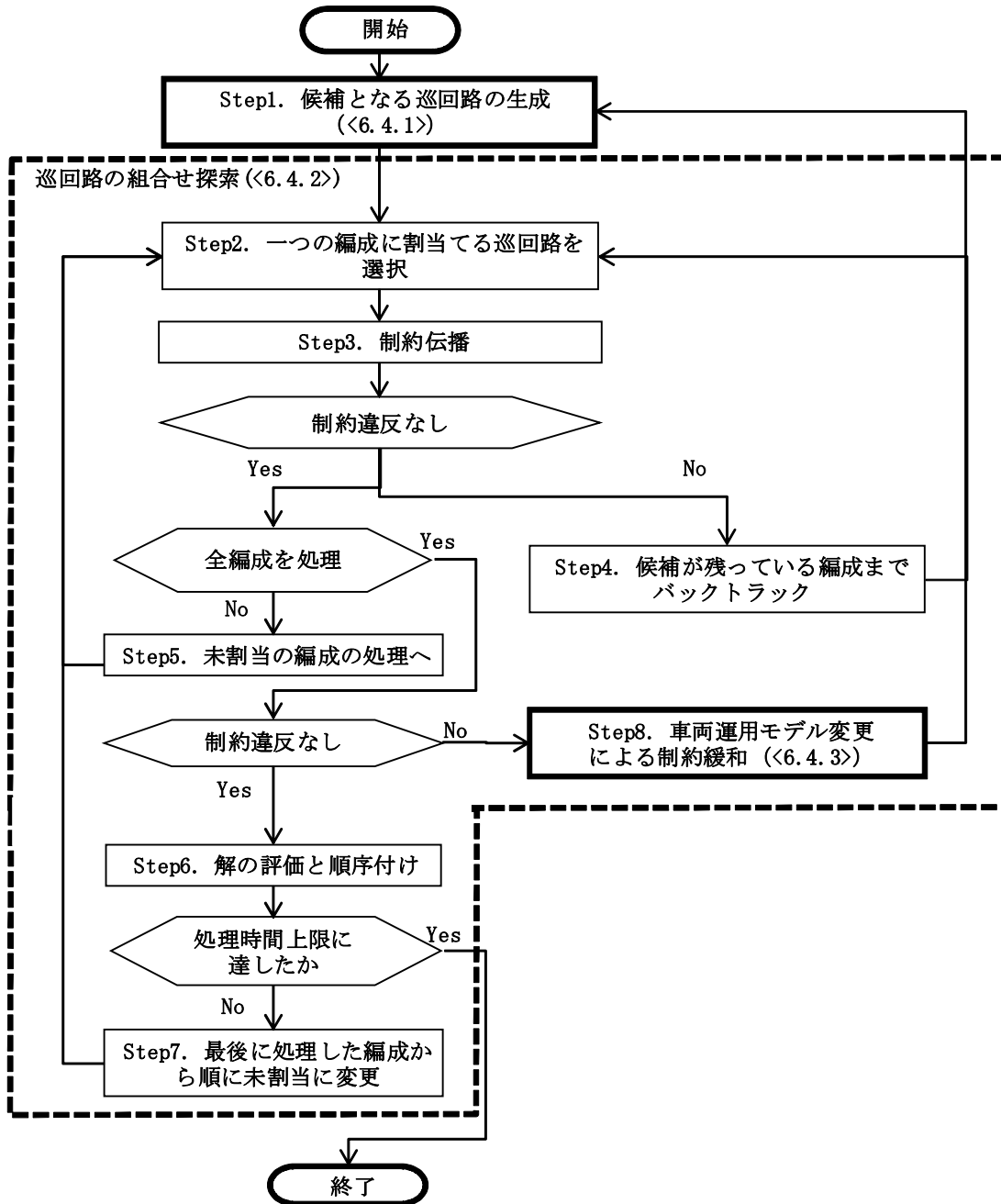


Fig. 17 基本フロー

### (3) 制約緩和 (Step 8)

制約違反が残る場合は制約緩和を行う制約緩和は、前述 6.3 に示した車両運用制約モデルに変更操作を加えることで実現する。

以降、候補となる巡回路の列挙、巡回路の組合せ探索、制約緩和それぞれについて示す。

#### 6.4.1. 編成行路計画の条件を満たす巡回路の列挙

編成行路計画の変更手段として基本的に用いられる「交換」と「付け替え」を用いた場合に解の候補となる巡回路を探索する。この探索で候補として列挙される巡回路は前述 6.1 で示した条件をすべて満たす巡回路である。解の探索にあたっては元の計画からの変更数を抑えるように、元の計画に相当する巡回路に実際の業務で実施している計画変更手段に相当する変更操作を加える。以降、「交換」と「付け替え」の各手段について記し、対応するネットワーク操作を Table 5 に示す。

Table 5 計画変更手段に対応するネットワーク操作

計画変更手段	ネットワーク上の操作	
	概要	図解
交換	元の計画を表すリンクを二つのノード間で入替えるようにリンクを選択する	<p>-----&gt; 元の計画    ———&gt; 選択</p>
付け替え	リンク元の列車の到着時刻後に出発する列車に順次リンクを変更する	<p>-----&gt; 元の計画    ———&gt; 選択</p>

##### (1) 交換

編成間で列車の割当てを入れ替える方法である。Fig. 18 に列車 4 が遅延したと仮定した例を示す。元の計画のままでは、列車 4 の終着時刻と列車 5 の始発時刻の順序が逆転し、時刻の接続条件が矛盾する。この場合、例えば、C 駅における編成 A と編成 B の列車の割当てを入れ替える。つまり、編成 A は列車 3 に割当てられた後、列車 5 で折返し、編成 B は列車 4 に割当てられた後、列車 6 で折返すようにする。

ネットワークの操作としては、入れ替え対象となる編成の行路に該当するリンクを選択し、それぞれの編成のリンク先のノードを交換することで実現する。Table 5 に示した例では、元の計画では列車 3 と列車 6、列車 4 と列車

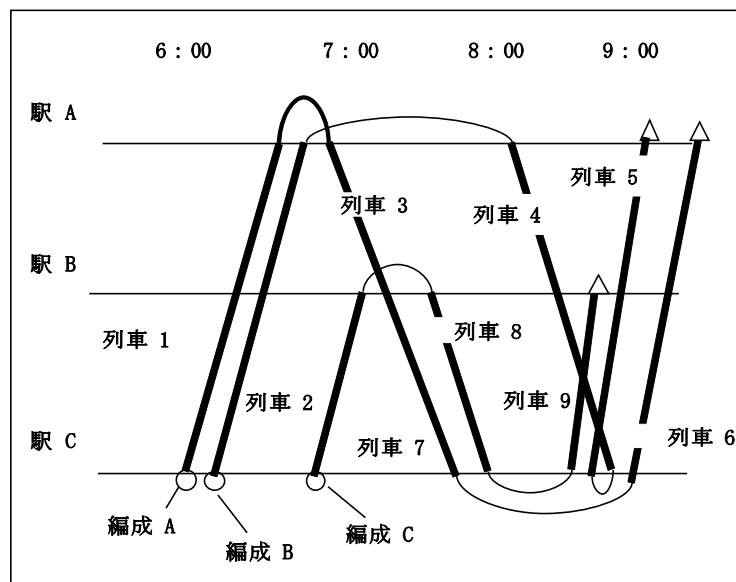


Fig. 18 車両運用計画の例

5 がそれぞれ同一編成の行路に含まれていた、つまりリンクで結ばれていたのに対して、それぞれのリンクのリンク先のノードを入れ替えることで、列車 3 と列車 5、列車 4 と列車 6 がそれぞれ同一編成の行路に含まれるように変更している。

入れ替える列車の組合せによっては個々の編成の滞泊駅が異なる場合があるが、滞泊編成数は変わらないため翌日の運行への影響を抑えることができる。このため最もよく使われる方法である。

## (2) 付け替え

編成に割当てる列車を元の計画から一つずつ後方の列車（元々割当てられていた列車の後に到着する列車）に変更する方法である。例えば Fig. 18 の例では、列車 3 が終着駅に到着後すぐ後に出発する列車は列車 9 であるため、列車 3 は列車 6 から列車 9 に付け替える。同様に、列車 4 と列車 8 についてもそれぞれ終着駅に到着後すぐ後に出発する列車である列車 6、列車 5 にそれぞれ付け替える。

ネットワークの操作としては、付け替え対象となる編成の行路に該当するリンクを選択し、選択した編成のリンク先のノードを、一つ後方の列車を表すノードに変更することで実現する。Table 5 に示した例では、元の計画では列車 3 と列車 6、列車 4 と列車 5、列車 8 と列車 9 がそれぞれ同一編成の行路に含まれていた、つまりリンクで結ばれていたのに対して、それぞれのリンクのリンク先のノードを付け替えることで、列車 3 と列車 9、列車 4 と列車 6、列車 8 と列車 5 がそれぞれ同一編成の行路に含まれるように変更している。

なお、交換は 2 つの編成間で列車を交換する手段であるのに対して、付け替えは 1 つの編成に割当てた列車のみを変更する手段である。このため、交換は各列車が編成に割当てられている状態を維持できるが、付け替えは他の編成の計画変更も必要となる。

#### 6.4.2. 巡回路の組合せ探索

前述 6.4.1 で生成した巡回路候補から解に含める巡回路を探索する。ここでは、制約プログラミング[97]を用いたバックトラックサーチを用いる。

編成行路計画の作成フローは Fig. 17 の Step2～Step7 に示した。各編成に割当てた巡回路を深さ優先探索で探索する。探索においては、無駄な解の発生を抑制するため、再計画が必ず必要となる編成、すなわち元の計画において接続条件や滞泊駅の条件、滞泊編成数の条件といった制約条件に違反する編成を優先的に処理する。以降、処理概要を記す。

まず、処理対象の編成に割当てた候補の巡回路を、元の計画からの変更が少ない巡回路から順に取得する (Step 2)。一つの編成への割当てを決定する度に制約伝播を行い、制約違反がないことを確認してから次の未処理の編成の処理を実施する (Steps 3～5)。得られた解の評価値を式 (6.3) によって算出し、これまでに算出した解と比較して評価値が低い順となるよう解を順序付けながら保持する (Step 6)。この処理を処理時間の上限に達するまで、最後に処理した編成から順に割当てた巡回路を変えながら繰り返す (Step 7)。

#### 6.4.3. 制約緩和

「交換」と「付け替え」による変更操作を用いた解探索で候補解を探索できなかった場合には、編成行路計画の変更手段として「滞泊駅変更」、「滞泊編成数

変更」, および「分割併合」を用いて, 更に候補となる巡回路の列挙を行う. これらの巡回路の探索は, 前述 6.3 で述べた「滞泊駅の条件 (前述 6.3 式 (6.4))」, 「滞泊編成数の条件 (前述 6.3 式 (6.5))」, または「列車両数の条件 (前述 6.3 式 (6.3))」を緩和することによる探索に相当する. これらの編成行路計画の変更手段における緩和方法の概要を Table 6 に示し, 以降, 詳細を説明する.

Table 6 制約緩和方法

	制約表現	緩和
滞泊駅の条件	<p>①滞泊駅が同一のノードのみ接続する</p> <p>②終着駅と滞泊駅が同一のノードのみ接続する</p>	<p>滞泊駅が異なるノードも接続する</p>
滞泊編成数の条件	<p>終着駅と滞泊駅が同一のノードのみ接続する</p>	<p>終着駅と滞泊駅が異なるノードも接続する</p>
列車両数の条件	<p>①列車ダイヤで計画された併合列車は列車ノードとして表す。</p> <p>○ 列車ダイヤで計画された列車</p> <p>②併合列車ノードなし。</p> <p>○ 列車ダイヤで計画された列車</p> <p>○ 併合列車</p>	<p>①列車ダイヤで計画された併合列車を併合列車ノードに変更する。</p> <p>○ 列車ダイヤで計画された列車 ○ 併合列車</p> <p>②併合列車ノードを追加する。</p> <p>○ 列車ダイヤで計画された列車 ○ 併合列車</p> <p>なお、解として得られた巡回路において、併合列車ノードの後に接続されるノードと併合相手の列車ノードの後に接続されるノードとがそれぞれ異なる列車または異なる種別を表すノードとなった場合、分割とみなす。</p>

(1) 滞泊駅の条件

終端ノードと編成ノードを無条件に接続するように車両運用制約モデルを変更する. これにより, 各編成の行路となる巡回路は所定の滞泊駅とは異なる駅を属性に持つ終端ノードも通るようになり, 結果, 滞泊駅が所定と異なる行路が作成される. 以降, Table 6 の例を用いて説明する.

Table 6 の「滞泊編成数の条件」に示した例では、終着駅が駅 A である列車 1 のノードと元々の編成 A の滞泊駅を表す滞泊ノード A とをリンクで接続し、かつ編成 A を表す編成ノード A は滞泊ノード A とのみリンクで接続していた。これにより、編成 A の行路に相当する巡回路は、終着駅が駅 A である列車ノードを必ず通るようになり、編成 A の行路は必ず駅 A で滞泊する計画となっていた。これに対して、制約緩和の処理では、編成ノード A を、元々の滞泊駅が駅 B である滞泊ノード B ともリンクで接続するように変更している。これにより、編成 A の行路に相当する巡回路は、元々の滞泊駅ではない駅 B を通ることもできるようになり、編成 A の行路は駅 A 以外でも滞泊する計画も作成され得るようになる。

### (2) 滞泊編成数の条件

列車ノードと終端ノードをつなぐリンクを、列車の終着駅と終端ノードの滞泊駅とが異なる場合でも生成するように変更する。これにより、終端ノードが全て被覆されたとしても、元の滞泊駅とは異なる駅で終了する行路が存在するようになるため、駅ごとの滞泊編成数が必ずしも元の計画通りではなくなる。以降、Table 6 の例を用いて説明する。

Table 6 の「滞泊編成数の条件」に示した例では、終着駅が駅 A である列車 1 のノードと元々の編成 A の滞泊駅を表す滞泊ノード A をリンクで接続していた。これにより、編成 A の行路に相当する巡回路は、終着駅が駅 A である列車ノードと滞泊ノード A を必ず通るようになり、編成 A の行路は必ず駅 A で滞泊する計画としていた。これに対して、制約緩和の処理では、終着駅が駅 A である列車 1 のノードを元々の滞泊駅が駅 B である滞泊ノード B ともリンクで接続するように変更している。これにより、編成 A の行路に相当する巡回路は、元々の滞泊駅ではない駅 B を通ることもできるようになり、編成 A の行路は駅 A 以外でも滞泊する計画も作成され得るようになる。よって、駅 A における滞泊編成数が元の計画から変更されるような計画も作成できるようになる。

### (3) 列車両数の条件

分割併合を用いて列車の車両数の制約を緩和する場合、列車ノードを併合列車ノードに変更する、または併合列車ノードを追加する。併合列車ノード



は、併合相手の列車に相当する列車ノードを複製したノードであり、列車ノードとは異なり必ずしも編成を割当てなくてもよいノードとして扱う。具体的には、元の列車ダイヤで定義された車両数よりも減らす場合は①を実施し、増やす場合は②を実施する。

#### 【①列車ダイヤ上の分割併合の変更】

列車ダイヤ上で計画されている併合列車に相当する列車ノードを「併合列車ノード」に変更する。なお、列車ダイヤ上で計画されている併合列車は、列車運行の前に列車ダイヤを作成する際に乗客数を予測して決定される。以降、Table 6 の例を用いて説明する。

Table 6 の「列車両数の条件」の①に示した例では、列車 3 に相当する列車ノードを 2 つ作成することで、列車 3 に必ず 2 つの編成を割当てるようにしている。これに対して、制約緩和の処理では、列車 3 に相当する片方の列車ノードを併合列車ノードに変更している。列車ノードは必ず一つの巡回路に含まれるようにする制約が設定されているが、併合列車ノードは、併合列車ノードを含む巡回路は一つ以下という条件となっている（式 (6.4) (6.5)）。これにより、列車 3 を含む巡回路が一つのみという解も許容されるようになり、結果、列車 3 に割当てられる編成が 2 つから 1 つに変更となり、車両数が減少する。

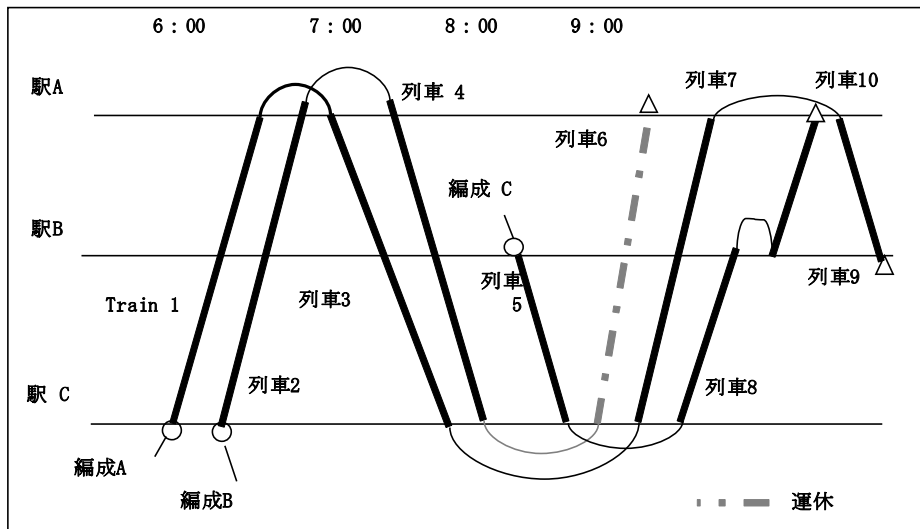
#### 【②併合列車の追加】

元の列車ダイヤで計画されていない併合を追加する。解の候補が無駄に増加することを防ぐため、元の編成行路計画が、接続条件または滞泊編成数の条件に違反する場合に違反を解消する効果が高い区間に併合列車ノードを追加する。具体的には、制約条件の違反が生じ、かつ分割併合を実施可能な駅を両端にもつ区間を特定し、当該区間の始端から終端までを走行する列車の列車ノードを複製することで併合列車ノードを作成する。このとき、複数の列車をつなぎ合わせることで当該区間の始端から終端までを走行してもよいものとする。複数の列車をつなぎ合わせる場合は、このような列車の組を「連続併合候補」とし、途中で組合せが変わらないように常に同じ巡回路に含まれるように考慮する（式 (6.6)）。また、2 つ以上の編成を併合可能である場合は併合可能な編成数分、併合列車ノードを追

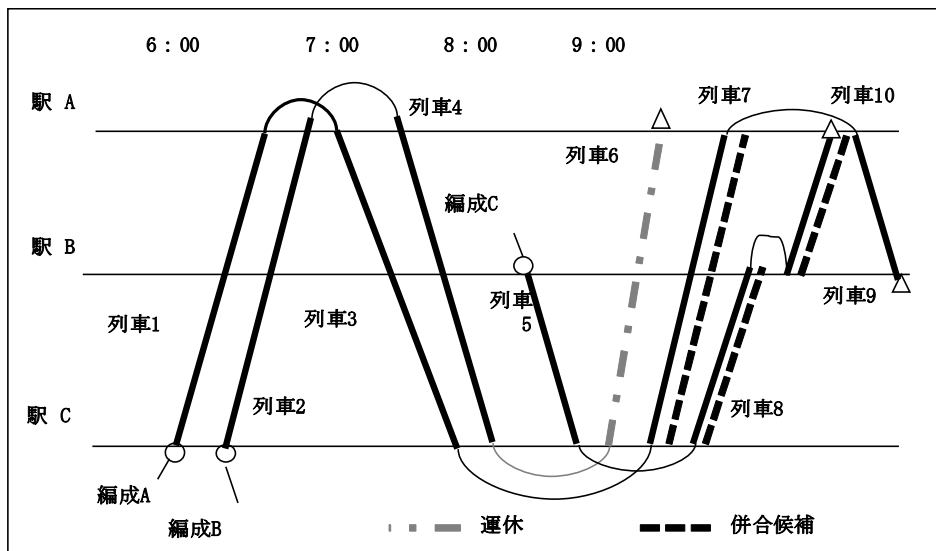
加する。併合可能な編成数は、各列車の元々の車両数と各路線の設備の制約によって判定する。本論文では、1編成まで追加可能なデータを用いたため併合列車ノードは各列車に対して1つ追加した。以降、Table 6の例を用いて説明する。

Table 6の「列車両数の条件」の②に示した例では、元々は併合列車ノードが設定されていなかった列車8と9に対して、制約緩和の処理では併合列車ノードを追加している。これにより、列車8と9に相当する列車ノードを含む巡回路に加えて、列車8と9に相当する併合列車ノードを含む巡回路も解に含めることができるようになる。結果、列車8と9に割当てられる編成が1つから2つに変更となり、車両数が増加する。

Fig. 19に併合列車の追加の例を示す。Fig. 19(a)に示す通り、列車6が運休となった場合を考える。列車6が運休となることで、編成Bの滞泊駅がA駅からC駅に変更となり、A駅の滞泊編成数は「-1」、C駅の滞泊編成数は「+1」となる。この場合、C駅～A駅間を制約違反が生じる区間として特定し、当該区間を走行する列車としてFig. 19(b)の通り、「列車7」と「列車8と列車9の組」を選択し、それぞれについて併合列車ノードを追加する。列車8と列車9の組については連続併合候補とする。



(a) 元の計画



(b) 併合列車の候補

Fig. 19 併合列車の例

## 6.5. 提案方式の実験評価

### 6.5.1. プログラム実装

数値実験による評価を実施するため、提案アルゴリズムを実装したプロトタイプシステムを作成した。プロトタイプシステムの構築環境は以下の通りとした。

開発言語 : C++

開発環境 : Borland C++ Builder 6

計算機 : Pentium 4 (3.2 GHz and 2 GB)

Operating System : Windows 7, 32bit

提案アルゴリズムの擬似コードを Fig. 20 に示す.

```
Repeat 以下の処理を繰り返す

  Initialize each variables. 各変数の初期化
  Create a network model. ネットワークモデルの作成
  Generate candidate routes. 候補の巡回路の生成
  Generate constraints and set them to Constraint Programming (CP)
  library as a model.
  制約条件を生成し、制約プログラミング (CP) のライブラリにモデルと
  して設定
  For each train unit in the targeted set
    処理対象の集合に含まれる編成一つ一つに対して以下の処理を実施
    If there is no candidate for the targeted train unit, go back to the
    search process for the previous train unit to reselect other route for the
    previous train unit.
    処理対象の編成に対する候補がない場合、前の編成の処理に戻り巡
    回路を選択し直す
    Select a route from the candidate routes.
    候補の巡回路から一つを選択
    Generate global constraints, which restrict variant values among
    train units, and add them to the model of CP library.
    編成間をまたがる変数の値を制限するグローバル制約を生成し、CP
    ライブラリのモデルに追加
    Verify whether the selected route can satisfy the pre-defined
    constraints by using the CP's function of constraint propagation.
    選択した巡回路が事前に設定した制約条件を満たすかどうかをCPラ
    イブラリの制約伝播機能を使って確認
    If the route cannot satisfy the pre-defined constraints:
    選択した巡回路が事前に設定した制約条件を満たせない場合 :
    if there is any candidate routes which have not been selected:
    未選択の候補の巡回路がない場合 :
    go back to the beginning of this search to reselect route from
    the candidate routes.
    探索の始めに戻り、他の候補の巡回路を選択し直す
    else:
    それ以外 :
    modify the network model to relax constraints.
    制約条件を緩和するようにネットワークモデルを変更
    next train unit 次の編成の処理へ

until processing time is under the limited time.
処理時間が上限に至るまで繰り返す
```

Fig. 20 車両運用整理アルゴリズムの擬似コード

### 6.5.2. 評価方法

実験データに対して、編成行路計画変更案を算出し、算出結果を式 (6.1) (6.2) にて示した輸送サービスの観点および車両運用の観点で評価した。

輸送サービス（輸送力）の観点での評価は、解の探索時には式 (6.1) の値で評価するが、以降に示す実験結果では式 (6.1) の  $O_1'$  の値を示す。式 (6.1) の値は元の計画の輸送力以上となるケースでは一律「0」となり、解として得られた結果の輸送力が元の計画からどの程度差があるかが読み取れない。このため、以降の実験結果では元の計画の輸送力に対する解の輸送力の差（増加率）を表す  $O_1'$  の値を用いる。

車両運用の観点での評価は、式 (6.2) における各重みをそれぞれ  $w_1=0.1$ ,  $w_2=0.5$ ,  $w_3=1.0$  として算出する。「滞泊編成数の変更」は、翌日の運用に影響を及ぼすため重要度は最も高く設定し、「折返し前後の列車の組合せの変更」は影響範囲が当日の運用のみとなるため最も小さい重みとし、「分割併合の変更」は、翌日の運用には影響がないが、当日に特殊な作業が必要となるため中間値を設定した。式 (6.2) の値が「1」未満の場合は、車両運用に最も悪影響を与える滞泊編成数の変更がないことを表すため車両運用の観点からは比較的良い解といえる。「1」以上となると滞泊編成数の変更や複数の列車の車両数の増加が生じている可能性が高く、特に「2.5」以上の値は、滞泊編成数の変更が2編成以上や列車の車両数の増加が3両以上など車両運用への影響が大きい変更となる可能性が高い。

正規化は、式 (6.2) (6.3) いずれにおいても本実験データでは不要とした。式 (6.2) の各項目の値域は列車本数または編成本数に依存しており、本実験データでは列車本数は編成本数の約10倍となるため各項目の値域に差がでる。しかし、列車本数に依存する項目の重み（「分割併合」と「折返し前後の組合せ」に対する重み）を編成本数に依存する項目の重み（「滞泊編成数」に対する重み）の0.1~0.5倍に設定しており各項目の重み付け値の値域は大きな差を生じない。このため式 (6.2) の正規化は不要とした。また、式 (6.3) は、予備実験の結果、評価関数 (6.1) の値域と評価関数 (6.2) の値域に大きな差は生じなかったため正規化は不要とした。

再計画の対象は、運休した列車を含む6時間程度を対象とし、計算時間の上限を5分として計算した。計算時間は、Fig. 17に示した一連の処理フローに要

する時間とする。なお、実際に車両運用に従事している担当者にヒアリングしたところ、一つの事象（一つの列車に対する運休）に対する作業の所要時分は10分以内であったため今回の計算時間は5分を上限として設定した。また、実際の業務では運行状況が刻一刻と変化するため直近の3~4時間程度、長くて5~6時間程度が再計画対象となる。このため、6時間程度を再計画対象としておけば実用性は確保できると考える。

実験にあたり、制約の緩和は、「列車両数の条件を緩和した場合（緩和①）」と「列車両数の条件および滞泊に関する条件の両方を緩和した場合（緩和②）」の2通り実施した。滞泊に関する制約のみを緩和した場合を実施しない理由は、運休による接続違反は滞泊駅に関する制約を緩和しただけでは解を得られないためである。

### 6.5.3. 実験データ

運行乱れを想定した列車ダイヤに対して提案手法を用いて解を算出し、結果を考察する。実験には、32bitのWindows7、3.4GHzのCPU、4.0GBのメモリを使用した。制約プログラミングの標準処理を実行するソフトウェアは筆者が所属する研究所内にて独自開発したソルバを用いた。

実際の中規模線区（編成数が50編成、列車数が約430本）、複数の行き先が混在している路線（主な行き先は4種類）を対象に、車両故障が起因の運休が発生したことを想定して、ランダムに運休を1~2本設定することでテストデータを作成した。列車ダイヤに含まれる全ての列車の組合せについて運休を設定することで網羅的にテストデータを作成することは可能であるが、列車の本数や運休列車の本数が増えるとデータ数が膨大となる。一方で列車を運休した場合の影響は列車密度および列車の行き先に応じて変わる。このため、列車密度および列車の行き先に基づいて列車の運用時間帯を分類し、各時間帯から最も運行頻度の高い列車をランダムに最大2本を選択して運休することで必要なテストデータを作成した。なお、各時間帯は時間幅にすると2~3時間であり、現実的には各時間帯について最大2本の運休ケースを作成すればテストデータとしてはほぼ十分であると考えられる。列車の運用時間帯の分類を以下に示す。

- (a) 通勤ピークに備えて車両基地から車両を出す時間帯
- (b) 通勤ピークの時間帯（終着駅での折返し運用を行っており車両基地への出入りがほとんどない時間帯）

- (c) 通勤ピークを終え、車両を車両基地に戻し始める時間帯
- (d) 車両基地に戻る車両が多い時間帯
- (e) 車両基地に車両を戻し終えた時間帯（終着駅での折返し運用を行っており車両基地への出入りがほとんどない時間帯）
- (f) 通勤ピークに備えて車両基地から車両を出す時間帯
- (g) 通勤ピークの時間帯（終着駅での折返し運用を行っており車両基地への出入りがほとんどない時間帯）
- (h) 通勤ピークを終え、車両を車両基地に戻し始める時間帯
- (i) 一日の運用を終了し、全ての車両を車両基地に戻す時間帯

上記9つの時間帯についてテストデータを2ケースずつ作成し、計18ケースとした。作成したテストデータを用いた場合の定式化における定数の値を Table 7 に示す。

Table 7 実験データにおける変数値

N : 編成の総数	50
R  : 集合Rの要素数 (解候補の巡回路の数)	14799 (Data1), 19285 (Data2), 8697 (Data3), 2304 (Data4), 2706 (Data5), 7530 (Data6), 13002 (Data7), 26264 (Data8), 25920 (Data9), 14867 (Data10)
M  : 集合Mの要素数 (全ノードの集合の数)	557 (Data1), 558 (Data2), 537 (Data3), 537 (Data4), 539 (Data5), 538 (Data6), 539 (Data7), 582 (Data8), 562 (Data9), 580 (Data10)
V : 列車の元の計画における車両数の総和	346 (Data1), 385 (Data2), 256 (Data3), 253 (Data4), 295 (Data5), 302 (Data6), 349 (Data7), 291 (Data8), 327 (Data9), 207 (Data10)
Mtr  : 集合Mtrの要素数 (列車ノードおよび併合列車ノードの数)	457 (Data1), 458 (Data2), 437 (Data3), 437 (Data4), 439 (Data5), 438 (Data6), 439 (Data7), 482 (Data8), 462 (Data9), 480 (Data10)
St  : 集合Stの要素数 (駅の数)	12
Ne : 元計画における滞泊編成数	37 (A駅), 1~2 (その他駅)
Ns : 併合列車以外のノード数	約530



#### 6.5.4. 実験結果

計 18 ケース中で解を得られたのは 10 ケースであり、解の探索成功率は 55.6% となった。解を得られなかったケースをみると、いずれも追加で運休を設定しないと解を得られないケースであり、今回対象とする車両数の変更や滞泊駅・滞泊編成数の変更では対応できないケースであった。

以下では、まず、解を得られたケースについて朝と夕方の各時間帯において得られた解の例を示し、その内容について検討を加える。その後、解が得られなかったケースの例を示し、その要因について考察する

##### (1) 車両運用整理結果の出力結果（一部）

提案アルゴリズムによる算出結果のうち朝と夕方それぞれの時間帯における例を示す。

##### 朝の時間帯における出力結果の例

Fig. 21 に朝における算出結果の例を示す。Fig. 21(a)および(b)が再計画前の状態である。図中の点線で示した列車②と④が運休となったケースである。列車②と④が運休となることで、その後に同一編成を割当てする予定であった列車⑤と⑥について、編成が割当てられない状態となる。列車⑤または列車⑥に編成を割当てするためには、上記(1)に示した例と同様に、それぞれの始発駅である A 駅を終着駅とする列車、または運休となった列車と同一区間である B 駅～A 駅間を走行する列車を探して行路を変更する必要がある。

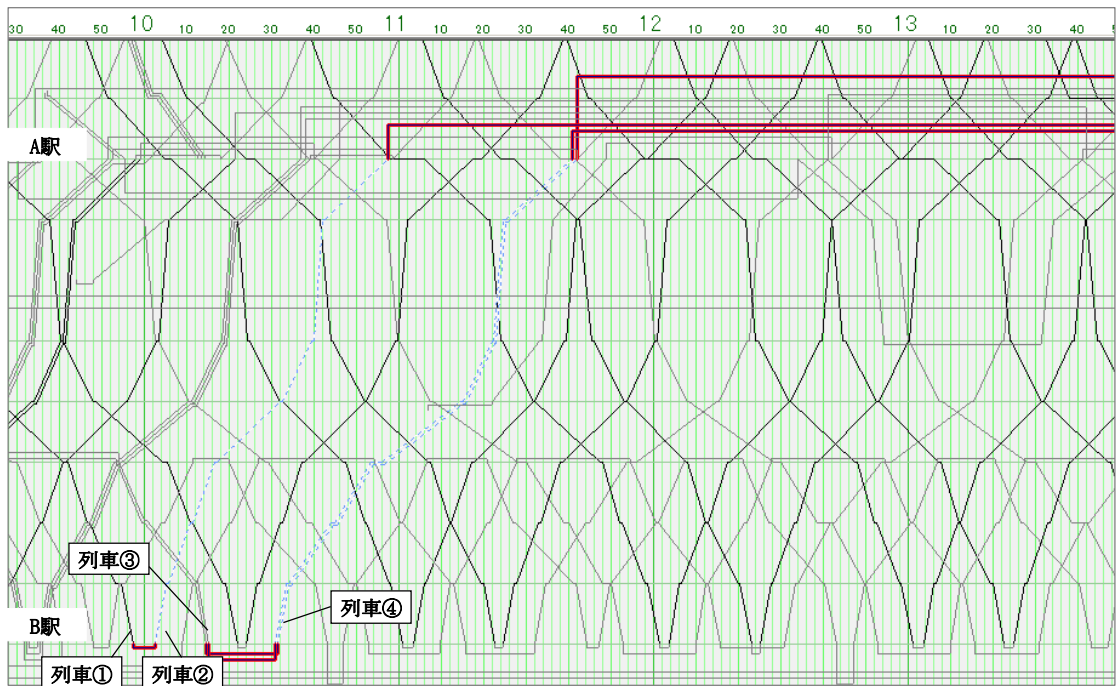
提案方式を用いて再計画した結果を Fig. 21(c)および(d)に示す。図中の太線は、追加した併合列車を表す。列車⑦～⑨に併合列車を追加し、列車②と④それぞれに割当てていた編成を各併合列車に割当てて A 駅まで走行させ、その後、列車⑤と⑥それぞれに割当てする計画となっている。

上記に示した解以外の手段も考え得るが、いずれも今回のケースでは解として成り立たない手段や上記に示した解よりも評価指標が低下する案となる。上記以外の手段として、A 駅を出発する列車のうち複数の編成を併合して走行させている列車を見つけ、併合を取りやめて余った編成を列車⑤または⑥に割当てする案が考えられる。また、A 駅で運用を終了する編成を列車⑤または⑥に割当てする案も考えられる。しかし、今回のケースではいずれの案も該当する列車または編成が

ない。また、A 駅を出発する他の列車に割当ててる予定の編成、例えば、Fig. 21 (d) の列車⑩～⑫、を列車⑤または⑥に割当ててることも考えられる。しかし、この場合、その編成を元々割当ててる予定であった列車へ編成を割当ててるために併合列車の追加や併合の取りやめが必要となり、解として提案した案よりも変更数が増える、つまり車両運用の観点で評価指標が低下する解となる。以上より、上記に示した解のように併合列車を追加して列車⑤と⑥に元々割当ててる予定であった編成を A 駅まで走行させる案が最も良い案となる。

以上に示したようなケースは、朝の時間帯や昼の時間帯のような乗客数が比較的少ない時間帯によく起こりえるケースである。乗客数が少ない時間帯では列車本数や両数が少なく、また朝・昼の時間帯は一日の半ばであるため運用を終了する編成も少ないため、上述の通り、取り得る手段が限定されてくる。このようなケースでは、列車が運休されると、今回示した解のように併合列車（または回送）を使って運休前に予定していた駅まで編成を移動させるか、編成が割当てられない列車は運休とする対応となる。

(a) 再計画作成前①



(b) 再計画作成前②

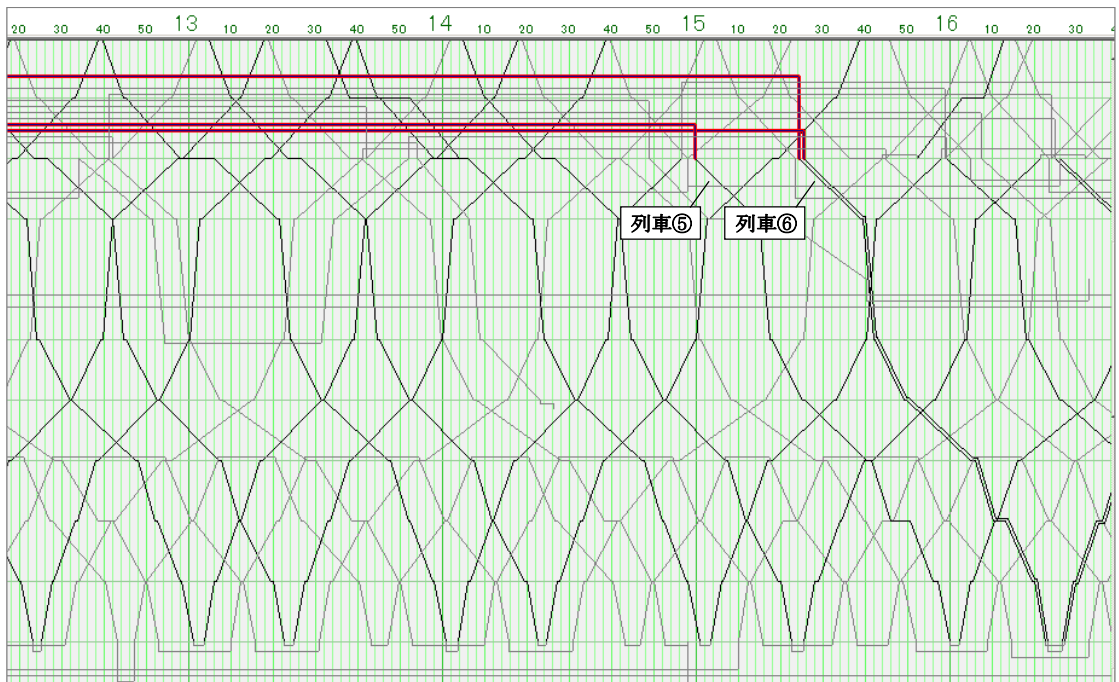


Fig. 21-1 朝時間帯の算出結果の例



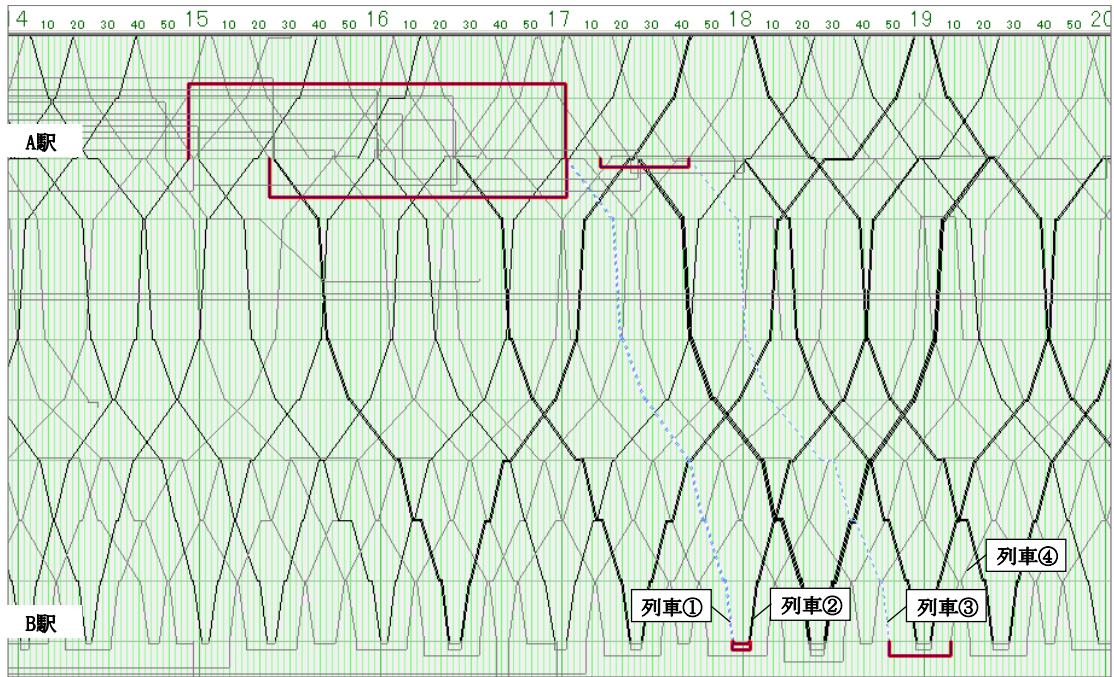
ある。図中の点線で示した列車①と②が運休となったケースである。列車①と③が運休となることで、その後に同一編成を割当てする予定であった列車②と④について、編成が割当てられない状態となる。列車②または列車④に編成を割当てするためには、前述の例と同様に、それぞれの始発駅である B 駅を終着駅とする列車、または運休となった列車と同一区間である A 駅～B 駅間を走行する列車を探して行路を変更する必要がある。

提案方式を用いて再計画した結果を Fig. 22 (b) に示す。列車⑤と⑥に併合列車を追加し、列車①に割当てする予定であった編成をそれぞれ割当てすることで各編成を列車②の出発前に B 駅に移動させ、その後、両編成を列車②に割当てている。なお、列車①と②は元々、2つの編成を併合させて走行させる列車であるため、2編成が割当てられていることに注意されたい。同様に、列車⑦に併合列車を追加し、列車④に編成を割当てている。

上記に示した解以外の手段も考え得るが、上記に示した解よりも評価指標が低下する案となる。上記以外の手段として、前述の例と同様に、B 駅を出発する列車の併合を取りやめることで余らせた編成や B 駅で運用を終了する編成を列車②または④に割当てする案が考えられる。例えば、Fig. 22 (b) の列車⑧や⑨の併合列車を取りやめることで列車④に編成を割当てることができる。こうすることで、列車⑧や⑨の後にこれらの編成を割当てする予定であった列車に編成が割当てられていない状態となるが、それらの列車には、列車④に割当てする予定であった編成を割当てることができる。特に、列車⑧の場合は、割当てられていた編成の一方は列車⑧で走行した後に運用を終了する予定となっているため、併合を取りやめる列車として列車⑧を選択することで、その後の計画は変更せずに解を得ることができる。しかし、今回の実験では、輸送サービスに関する評価指標を優先するような重み付けを行ったため、併合列車を取りやめるという輸送力の低下につながるこれらの案よりも、提案方式で得られた解の方が良い解となる。

以上に示したようなケースは、夕方以降の時間帯のように運用を終了する編成が増える時間帯によく起こりえるケースである。今回は、輸送サービスの観点を重視した解の選択を行ったが、夜の時間帯、特に終電に近い時間帯では併合列車を追加することで運用を終了する駅が変わってしまい、翌日以降の計画に支障ができるケースも起こりえる。このようなケースでは、上記に示したその他の案のように、車両運用の観点を重視して併合列車の取りやめの方を選択するケースも考え得る。

(a) 再計画作成前



(b) 再計画作成後

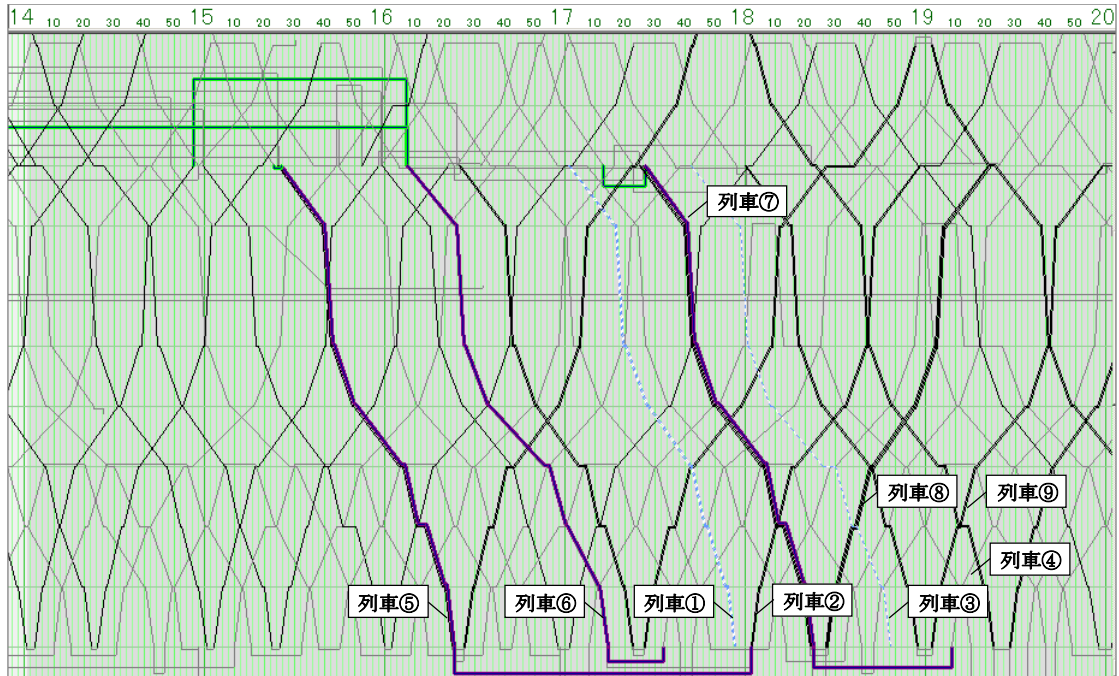


Fig. 22 夕時間帯の算出結果例

## (2) 解を得られないケース

解を得られなかったケースの例を Fig. 23 に示す。Fig. 23 は、図中の点線で示した列車②が運休となったケースである。列車①と③は、列車②と同一の編成（編成 A とする）を割当てられている列車であり、それぞれ列車②の前と後に走行する列車である。列車②が運休となることで、列車③について編成が割当てられていない状態となる。列車③に編成を割当てするためには、列車③の始発駅である A 駅を終着駅とする列車を探し、その列車の後に列車③をつけるように行路を変更すればよい。または、列車②と同様に B 駅～A 駅間を走行する列車を探し、列車①の後にその列車をつける、またはその列車に併合列車を追加して編成 A を併合して走行させるように行路を変更すればよい。

しかし、本例における時間帯は、A 駅から B 駅に向かう列車は多いが、B 駅から A 駅方面に向かう列車は、A 駅よりも更に先の駅まで走行する列車か、A 駅まで走行せずに途中駅で折り返す列車かのいずれかとなっている。このため、上記に示したような条件に該当する列車は見当たらず、列車③に編成を割当てられないため本ケースでは解を得ることができない。

実際の運用では、このようなケースは、列車③を運休にするか、A 駅に予備の編成があるようであればその編成を割当てるといった対応がとられる。運休や予備編成使用の可否については、その時々乗客数や車両状態・車両検査の予定などを考慮して判断する必要があり、運用整理の担当者のみでは決められないため、本研究では自動提案の対象外としている。実際の運用においては、解を得られない場合、列車ダイヤの担当者や車両保守の担当者と協議して運休や予備編成の使用を決定していくこととなる。

以上のようなケースは、同一の路線内でも区間によって乗客数が大きく異なるような路線において、乗客数が多い区間・時間帯に集中して列車本数を増やすような列車ダイヤで運行している場合に起こり得る。今回の実験対象と路線では朝の時間帯が該当しており、これにより、朝の時間帯で解を得られる割合が低くなっていると考えられる（詳細後述(3)(a)）。

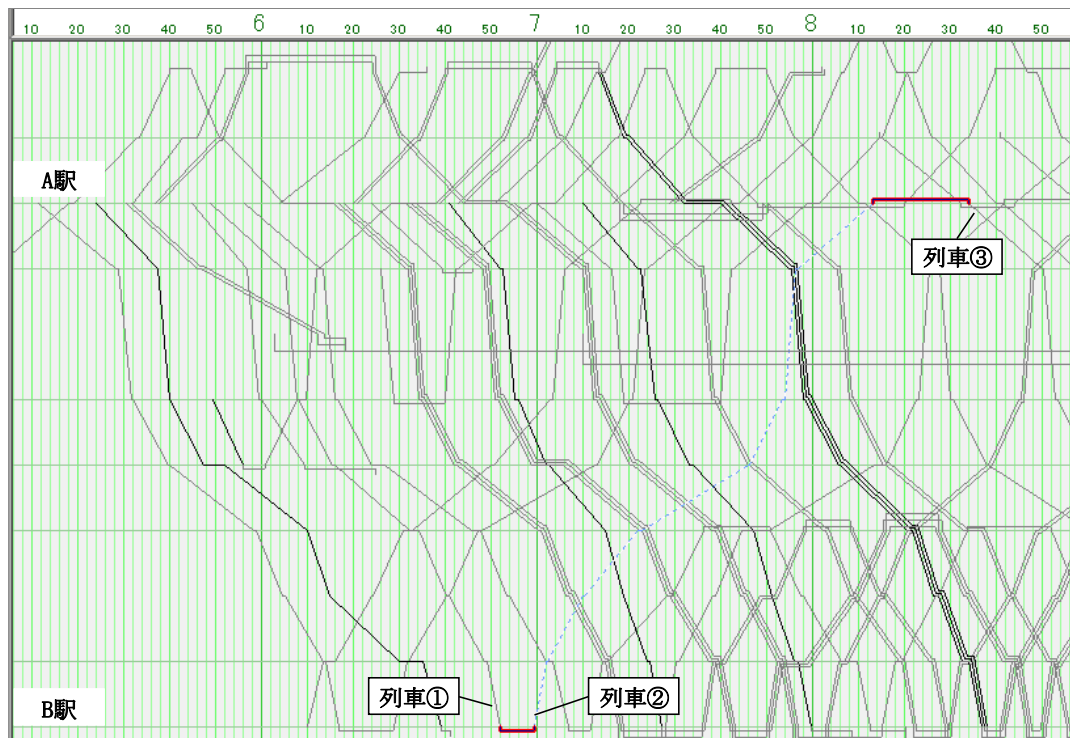


Fig. 23 解を得られないケースの例

### (3) 運転整理結果の評価

解を得られた 10 ケースについて総合的な評価と考察を行い、続いて、個別ケースに対する評価と考察を示す。

#### (a) 総合評価

各ケースに対して緩和①と②それぞれにおける結果を算出し、良い方を選択した場合のグラフを Fig. 24 に示す。

許容解の目安となる境界を点線で示した。点線で示した境界より上部であれば許容解とする。許容解の判断基準は状況により異なると考えられるが、本研究では、輸送サービスの低下すなわち輸送力の増加率が元の計画の「-1%以内」であれば許容範囲とした。この基準は、1列車の輸送力を1500人（10両編成、150人/両）とした場合に1列車平均15人以内の輸送力の減少を許容することに相当する。また、車両運用効率の低下度合は輸送サービスの増加率の0.5として許容解の境界を設定した。この基準は、滞泊編成数の変更1つにつき輸送力の増加率「-0.5%」すなわち1列車7.5人以内の減少であれば許容することに



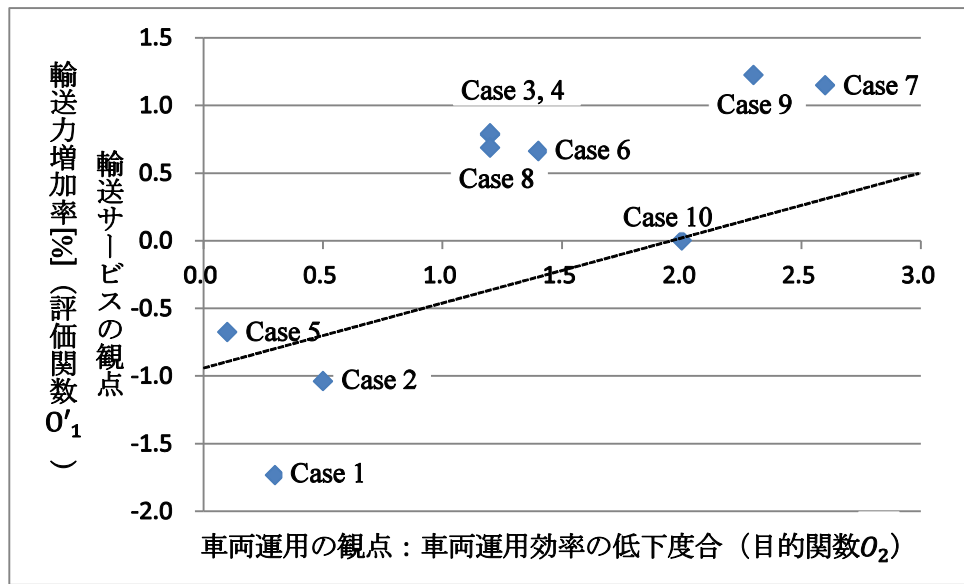


Fig. 24 総合評価

相当しており、十分に現実的な基準であるといえる。

Case 1 と 2 は許容範囲外となった。これらのケースは朝時間帯のケースであり、1 日のうちで列車密度が最も高い時間帯であるため車両運用効率を低下させても輸送力の回復が難しいと考えられる。上記以外のケースでは許容範囲内の結果を得ることができた。以上より、朝の時間帯以外であれば、輸送サービスと車両運用の両方の観点から許容可能な解を提案アルゴリズムで得ることができるといえる。

今回は、許容解の基準を全てのケースに対して一律で設定したが、実際には時間帯や運行状況によって基準は変化すると考えられる。例えば、朝の時間帯は混雑予想されるため輸送サービスの観点を緩和することはできないが、昼間や夜間帯では朝の時間帯ほど混雑していないと予想されるため車両運用の観点到重きをおいた基準を設定できると考えられる。このように、許容解の基準については適用路線の乗車人数の傾向や車両運用方針などをよく鑑みた上で設定し、提案アルゴリズムの効果を検証する必要がある。

次に、各時間帯の平均を Table 8 に示す。

探索成功率は、朝・昼・夕方以降でそれぞれ 33.3%、50.0%、83.3%となっており、朝が最も低く、夕方以降が最も高い結果となった。これは、朝は列車本数が最大であるため全ての編成が使用されており、かつ列車間隔も短いため計画

Table 8 時間帯別平均

		探索成功率 [%]	輸送力増加率 [%]	車両運用効率の 低下度合
朝	緩和①	33.3	-1.4	0.4
	緩和②		-1.9	2.3
昼	緩和①	50	0.3	0.8
	緩和②		0.1	1.5
夕方以降	緩和①	83.3	1.1	1.9
	緩和②		0.6	2.1

変更の余地がないためと考えられる。一方で、昼や夜間帯は列車本数が朝よりも減少し、車両基地に留置する編成があるため計画変更の余地があり、探索成功率を高くしていると考えられる。実際に、輸送力の増加率を見てみると、朝の時間帯は負の値、すなわち輸送力を減らすことで解が得られており、昼と夕方以降では輸送力を増やす、つまり列車の車両数を増やすことで解が得られている。これにより、朝の時間帯は編成数が不足している一方で、昼や夕方以降は比較的余裕があることが伺える。

輸送力の増加率と車両運用効率の低下度合は、いずれの時間帯も緩和①の方が良い結果となっている。緩和①と②の違いは、前述とした通り、滞泊編成数の制約条件を考慮しないように緩和するかどうかの違いであり、緩和①は列車両数の制約条件は緩和するが滞泊編成数の制約条件は緩和せず、緩和②は列車両数の制約条件と滞泊編成数の制約条件の両方を緩和する処理となっている。緩和②で滞泊編成数の制約条件を考慮しないことで、列車両数の制約条件の充足度が向上し、輸送力の低下率も向上する（すなわち増加率が高くなる）ことが期待されたが、実験結果から期待通りの効果は得られないことが見て取れる。

#### (b) ケース別評価

各ケースについて、車両運用の観点と輸送サービスの観点それぞれにおける評価値を Table 9 に示す。表中の下線が引かれた数値が最終解として選択された値である。

得られた解のうち 65.0% (20 件中 13 件) が、輸送力の増加率が 100.0% よりも大きく（つまり、列車の車両数を元の計画よりも増やし）、かつ運用効率の低下度合いを表す点数が「1」以上となっており、運用効率よりも輸送力を重視し

た解が得られる傾向が強い。これは、制約緩和の方法として、併合列車の増減によって列車の車両数や滞泊編成数を変更する方法を採用した影響によると考えられる。すなわち、併合列車の追加は、接続条件や滞泊編成数の条件に違反が生じる区間に焦点をあてて比較的自由に行うことができるのに対して、併合列車の削減は元の計画で併合列車が定義された区間しか行うことができない。このため、併合列車を追加する方が効果的に違反を解消できる可能性が高くなり、結果的に併合列車を追加する、つまり列車の車両数を増加させるような解が多く得られていると考えられる。

Case 1, 2, 5 は、緩和①②いずれも輸送力と車両運用効率の両方を落とした解となっている。緩和①では車両運用効率の低下度合が「1.0」未満に抑えられているため、翌日の運行に影響を与える滞泊編成数の制約は守られていることが分かる。一方で、緩和②は車両運用効率の低下度合が「2.0」以上と大きく、滞泊編成数や分割併合など車両運用に関する制約を大幅に緩和して解を得ている。更に、輸送サービスの増加率は緩和①よりも悪化している。緩和②では、車両運用上の制約すなわち滞泊編成数の制約を緩和しているため、本来であれば車両運用の観点では悪くなるが輸送サービスの観点では良くなるような傾向が期待できる。しかし、輸送サービスの観点での改良は期待通りに得られない結果となった。これは、Case 1, 2 は一日のうちで運行頻度が最も高い朝の時間帯であり車両運用に余裕がないため、車両運用の制約を緩和しても輸送サービスの質を維持するには十分ではないと考えられる。Case 5 は、昼の時間帯であるが夕方ピークに近い時間帯であるため、Case 1, 2 と同様に車両運用に余裕がないと考えられる。

Case 3, 4, 6, 7, 8 は緩和①②いずれも輸送力の増加率が正の値つまり車両数を増やすことで解を得ている。車両運用効率は「1.0」を越えているため滞泊編成数の制約を遵守していない可能性が高い。旅客からみた輸送サービスには影響がないが、車両運用を犠牲にした解となっている。

Case 9 と 10 についても、輸送サービスには影響がないが、車両運用を犠牲にした解となっているが、緩和①と②では得られる解に差がでていいる。Case 9 では、緩和①よりも緩和②の方が輸送力の低下は抑えられている（すなわち、輸送力の増加率が正の値となっている）一方で、車両運用効率の低下度合が大きくなっている。Case 10 では、輸送力の増加率と車両運用効率の低下度合いずれにおいても緩和②の方が良い解を得られている。Case 9, 10 は夜間の時間帯を対

象としたケースであるため一日の運用を終了する編成も多く、緩和②すなわち滞泊編成数の制約を考慮から外すことで運用終了後の編成を比較的自由に使えるようになるためと考えられる。

Table 9 実験結果

		評価値			輸送力の低下率[%]	車両運用効率の低下度合
		01+02	01	02		
Case 1 時間帯(c)	緩和①	<u>2.0</u>	1.7	0.3	-1.7	0.3
	緩和②	4.5	2.3	2.2	-2.3	2.2
Case 2 時間帯(c)	緩和①	<u>1.5</u>	1.0	0.5	-1.0	0.5
	緩和②	4.0	1.6	2.4	-1.6	2.4
Case 3 時間帯(d)	緩和①	<u>1.2</u>	0.0	1.2	0.8	1.2
	緩和②	1.2	0.0	1.2	0.8	1.2
Case 4 時間帯(e)	緩和①	<u>1.2</u>	0.0	1.2	0.8	1.2
	緩和②	1.2	0.0	1.2	0.8	1.2
Case 5 時間帯(f)	緩和①	<u>0.8</u>	0.7	0.1	-0.7	0.1
	緩和②	3.4	1.4	2.0	-1.4	2.0
Case 6 時間帯(g)	緩和①	<u>1.4</u>	0.0	1.4	0.7	1.4
	緩和②	1.4	0.0	1.4	0.7	1.4
Case 7 時間帯(g)	緩和①	<u>2.6</u>	0.0	2.6	1.1	2.6
	緩和②	2.6	0.0	2.6	1.1	2.6
Case 8 時間帯(h)	緩和①	<u>1.2</u>	0.0	1.2	0.7	1.2
	緩和②	1.2	0.0	1.2	0.7	1.2
Case 9 時間帯(h)	緩和①	<u>2.3</u>	0.0	2.3	1.2	2.3
	緩和②	3.2	0.0	3.2	0.6	3.2
Case 10 時間帯(j)	緩和①	2.2	0.0	2.2	1.9	2.2
	緩和②	<u>2.0</u>	0.0	2.0	0.0	2.0

## 6.6. 本章の総括

### 6.6.1. 結論

列車の運行が乱れた時の車両運用計画リスケジューリングを支援することを目的に、車両運用計画の一つである編成行路計画に対して、制約条件をネットワークモデルで表した車両運用制約モデルを導入し、本モデルの変更操作により、編成行路計画の変更案の作成および制約緩和を実現する手法を開発した。これにより、システムの内部処理を知らない計画作成者であっても制約条件を変更しながら計画を作成することができ、運行状況にあわせた柔軟な計画作成を支援することができる。

実際の中規模線区を想定したデータを用いた数値実験を実施し、ランダムに発生させた列車運休に対して解を算出し、得られた解を輸送サービスと車両運用それぞれの観点から評価した。実験の結果、制約緩和により、56.6%のケースで解を得ることができ、そのうち80%すなわち全体のケースの44.5%で輸送サービスの観点と車両運用の観点の両面から許容範囲内の解を得ることができた。また、運休を設定しないと解が得られないケース以外は制限時間5分以内に解を得ることができており、人手による対応の目安が5分であることを考えると計算時間の観点からは十分に実用的であるといえる。これにより、提案手法によって制約を緩和することで車両運用効率の低下を考慮しつつ輸送サービスを満足する代替案を実用的な時間で得ることができることを示した。

一方で、ランダムに生成したテストケースのうち44.4%は制約緩和でも解を得られないケースであった。いずれも追加で運休を設定しないと解を得られないケースであり、車両運用に関する制約緩和だけでは対応できないケースであった。運休は、列車間隔の調整を含めた列車ダイヤの全体的なバランスを考慮した変更が必要であり、車両運用計画の再作成の範疇を超えている。これらのケースに対応するためには列車ダイヤ作成に関する別手法を併用するなど別の対策が必要となる。

また、ケースによって輸送サービスへの影響度合にバラつきがみられた。これは、計画対象の時間帯によって編成数の余裕度合に差があることを示している。特に、朝の時間帯は列車両数を減らすことでしか解を得ることができないが、昼や夕方以降は列車両数の増加によって解を得ることができることを示している。

このように、提案手法によって分割併合を扱い、列車両数の制約条件の緩和を可能としたことで、編成数の過不足を検討できるようになる。提案手法を応用して、編成数を変更しながら得られた解を分析するシミュレーションツールを開発することで、運行乱れに対する列車ダイヤの頑健性と編成数や車両運用効率の観点とのトレードオフを分析することも可能となると考える。更に、第5章に示した車両割当計画に対する提案手法とあわせることで、保守作業コストの観点もあわせてトレードオフを分析することが可能となり、車両運用計画の前提条件となる保有編成数を見直すような車両導入計画を、実際の保守・運用コストまで見据えて立案する支援を行うことができると考える。

以上より、車両運用制約モデルを用いたリスケジューリング手法により制約緩和を含む行路計画の変更案を算出し、評価値と共に提供することで、輸送サービスと車両運用それぞれの観点から評価しながら解を示すことができることを示した。実利用にあたっては、車両運用への影響が少ない制約から緩和し、複数の解が得られる場合には輸送サービスの低下が許容値内である解の中から車両運用の観点でランキングした結果を示すといった利用が考えられる。

また、実験結果の評価の過程において、時間帯別に生成したケースによって得られる解の質を分析することで、運行乱れ時における編成数の過不足を把握することができることを示した。提案手法を応用することで、列車ダイヤを、運行乱れに対する頑健性や運用コストの観点から分析することを支援することができると思う。

## 6.6.2. 今後の課題

実用化に向けて以下が課題となる。

### (1) 解取得率の向上

より多くの状況に応じた解の試行錯誤を支援するため、制約緩和の方法を増やすことや列車ダイヤ作成手法の併用を実施し、より多くのケースで解を得られるようにすることが課題となる。

### (2) 計算時間の上限の検証

今回は、計算時間の上限を実際の業務上での作業時間を目安に設定したが、計算時間の上限は最適性の精度に大きな影響を与えるため、実用化にあたって

は、計算時間と計算精度の観点で最適な上限値を検証する必要がある。車両運用整理の難しさは、列車ダイヤの密度や行き先の多様性、使用している車両形式や分割併合のような車両運用方法など様々な要因が影響する。このため、計算時間の上限と計算精度の検証にあたっては、対象路線ごとに検証する必要があると考える。



## 第7章 総括

本章では、本論文で提案した最適化アルゴリズムの総括および今後の課題を示す。

### 7.1. 研究成果のまとめ

本論文は、鉄道輸送サービスにおける車両運用の効率化を目的に、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ヒューリスティックなスケジューリングアルゴリズムを提案し、実際の運用データを用いた数値実験をまとめたものである。研究対象は、日々の運行における車両運用計画である「車両割当計画」と「車両運用整理」とした。

既存研究として、車両割当計画と車両運用整理それぞれについて、整数計画問題または混合整数計画問題としての定式化および解法が提案される。しかし、以下の課題に対しては不十分である。

#### 車両割当計画：

行路に編成を割当ててる計画であり、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。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、すなわち応答性が高い車両割当計画アルゴリズムが求められる。

#### 車両運用整理：

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車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代替案を含めた解を提示するアルゴリズムが求められる。

上記課題に対応するため、まず、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、検査周期を効率よく遵守するためには編成に対する行路の割振り順序が重要となる。本研究では、検査回数を抑えて検査周期を遵守するための行路の割振り順序に関するノウハウを用いて行路の割振り（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てことで解の探索を効率化した。

計画の雛形の作成にあたっては、行路の割振り順序に関するノウハウをネットワークモデルのリンクの重みとしてモデル化し、ノウハウに適合する割振り順序をできるだけ多く含むリンク集合（経路）を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。ここでの経路探索は、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計画の雛型に編成を割当て、かつ定期検査の実施日を設定した。ここで、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。計画の雛型の変更は、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。

実際の小規模車両基地のデータ（10編成，16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 - Gurobi と比較して許容時間内（24時間以内）で得られる解の質を向上できることすなわち検査コストを35.0%低減できることを示した。また、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、計算時間は15時間程度であり、十分に実用的な時間内であることを確認した。また、問題規模でみると計算時間は  $n \log n$  よりはるかに小さい値となっており、スケーラビリティが確保できていることを示した。

次に、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それぞれ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車両運用制約モデルを提案し、制約緩和の処理

を車両運用制約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。車両運用制約モデルは、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ネットワークモデルで表すことで定義した。

解の探索アルゴリズムは、車両運用制約モデルから編成の数だけ経路を探索する処理となる。経路の探索にあたっては、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経路を予め列挙することで探索候補を絞り込み、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という計画変更の手段であり、変更回数を抑えつつ素早く解を得ることができる。これを車両運用制約モデルのリンク操作として定義することで解候補の経路を列挙した。

解候補から解に含める経路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、緩和可能な制約については緩和の処理を車両運用制約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ベースとし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の候補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ることができることを示した。なお、実験データの 44.4%は運休を設定しないと解を得られないケースであり、車両運用に関する制約緩和だけでは対応できないケースであることを確認した。

## 7.2. 今後の課題

本研究の成果を実際に活用するためには、提案したアルゴリズムを用いて車両運用業務の支援システムを開発する必要がある。以降では、支援システムの開発に必要な課題を示す。

### (1) 提案アルゴリズムの改良およびパラメータの検証

車両割当計画アルゴリズムでは、処理順序をランダムに変更しながら探索を行うため、得られる解の再現性と最適解を得られるまでの計算時間の判断が課題となる。特に、解の再現性については、計画作成者による手動変更を受けた後の再

計画機能として、一度作成した解からの変更を抑えた解の探索処理を実現する必要がある。提案手法のネットワークモデルに初期解からの変更を反映することで提案アルゴリズムを応用できると考える。

車両運用整理アルゴリズムでは、列車ダイヤへの影響が比較的少ない車両数の変更や折返し運用の変更などを対象に制約緩和手法を提案したため、得られる解は輸送サービスを優先する傾向となる。朝や夕方などのピーク時には運休や列車追加など列車ダイヤを変えるような手段が必要なケースも多く、より多くの状況に応じた解の試行錯誤を支援するためには列車ダイヤ作成手法との併用も検討する必要がある。

また、車両運用整理は運行乱れ時を対象としているため短時間での計算が求められる。今回は、計算時間の上限を実際の業務上での作業時間を目安に設定したが、計算時間の上限は最適性の精度に大きな影響を与えるため、実用化にあたっては、計算時間と計算精度の観点で最適な上限値を検証する必要がある。

## (2) ノウハウの組み込みによる探索結果の理解容易性向上

車両割当計画を作成する部署である車両基地や車両運用整理を行う運行指令所では、本研究で明らかにしたノウハウ以外にも現場ごとに特有のノウハウが多く存在する。それらの多くは、効率よく実行可能解を見つけるために過去の経験や実績を基に暗黙知として蓄積されている。計画をシステムで作成する際にも有効なノウハウもあれば、人手で計画を作成しているが故に必要なノウハウもある。

計画作成者へのヒアリングを通して暗黙知を形式知として明文化し、システム化において有効なノウハウを選別した上で提案手法に組み込むことで、探索効率の更なる向上が期待できる。また、ノウハウを取り込むことで、解の探索過程や得られる結果について計画作成者が理解しやすくなる効果も期待できる。鉄道に関わる現場では安全が最重要であるため、計画作成者による最終承認が重要となる。このため、探索過程や結果について計画作成者が理解できること（理解容易性）はシステム化において極めて重要な要素である。

本研究で提案した手法は、車両割当計画と車両運用整理ともに計画の雛型または候補となる部分解を基に解を探索する手法であり、解の探索アルゴリズムを変更することなくノウハウを反映することができる。このため、ノウハウが多い

現場には、最適化技法を適用した手法よりも適用しやすく、探索効率向上や解の理解容易性向上に有効であると考えられる。

### (3) 計画作成者とのマンマシンインターフェース

第3章で示した通り、車両割当計画や車両運用整理では計画修正や制約緩和が必要となる。本研究では、計画修正を行いやすいように応答性の高いアルゴリズムを提案し、制約緩和を支援するため複数の候補解を算出するアルゴリズムを提案した。これらのシステム化にあたっては、計画修正や制約緩和の選択を計画作成者から受け付けるための入力インターフェースが必要となる。特に、制約緩和については、複数の候補解を評価して選択するために評価の観点を変えながら候補解をランキングするような機能が必要となる。

### (4) 車両の新保全体系への対応

検査周期については、2002年に法令改正があり、一部の機器については使用状態に応じた検査体系が認められるようになった。これに伴い、機器の使用状態に応じて検査を実施する「状態基準保全 (Condition Based Maintenance: CBM)」も一部の鉄道事業者で取り入れ始めている[15]。CBMは海外においても車両保守における大きな潮流であり、今後、CBMを一部取り込んだ車両保全体系が導入されると予想される。機器の状態に応じた柔軟な検査作業を策定できるよう、車両割当計画においては車両基地のキャパシティをより細かい時間単位で考慮することや検査作業員の制約を考慮することなどが求められる。

## 謝辞

本論文は、筆者が 2005 年から現在に至るまで（株）日立製作所 システム開発研究所、横浜研究所、ならびにテクノロジーイノベーション統括本部にて従事してきた鉄道分野における計画業務支援システムの研究開発での経験に基づき、早稲田大学 大学院情報生産システム研究科において実施した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成果をまとめたものである。ご指導およびご支援賜った早稲田大学ならびに株式会社日立製作所内外の方々へ深謝の意を表す。

本研究を推進するにあたり、早稲田大学 大学院情報生産システム研究科教授 村田智洋先生に全過程を通じて懇切丁寧なご指導とご鞭撻を賜った。ここに深謝の意を表す。同研究科教授 李義韻先生には副査としてご助言戴くとともに本論文の細部にわたりご指導戴いた。ここに深謝の意を表す。同研究科教授 大貝晴俊先生、同研究科教授 田中英一郎先生、同研究科准教授 立野繁之先生には本論文をまとめるにあたり有益なご討論とご助言を賜った。ここに深謝の意を表す。

本研究の機会を与えて戴いた、株式会社日立製作所 システム開発研究所元所長 前田章博士（現 科学技術振興機構 未来創造研究開発推進部運営統括）、横浜研究所元所長 堀田多加志博士（現 株式会社日立製作所 サービス&プラットフォームビジネスユニット 制御プラットフォーム統括本部技師長）、テクノロジーイノベーション統括本部元副統括本部長兼横浜研究所所長 山足公也博士（現 日立オートモティブシステムズ株式会社執行役員 CTO 兼技術開発本部長）、同統括本部元副統括本部長兼横浜研究所所長 矢川雄一氏（現 同統括本部副統括本部長兼中央研究所所長）、同統括本部統括本部長兼横浜研究所所長 鮫嶋茂稔博士に深謝の意を表す。同じく、本研究の機会を与えて戴き、実用化の観点からご指導戴いた、株式会社日立製作所 公共社会ビジネスユニット 社会事業部交通情報システム本部長 黒川幸市郎氏に深謝の意を表す。また、本研究をまとめるにあたっての動機付けおよび高所からご指導とご鞭撻を賜った、株式会社日立製作所 横浜研究所元主管研究員 河野克己博士（現 大阪工業大学教授）に深謝の意を表す。さらに、元上司として本研究と本論文をまとめる機会を与えて戴くと共に高所からのご指導とご鞭撻を賜った、株式会社日立製作所 システム開発研究所

佐々木敏郎氏（現 退職）、森田豊久氏（現 株式会社日立システムズ 研究開発本部研究開発センタ主管研究員）、テクノロジーイノベーション統括本部 社会インフラシステム研究部 加藤博光博士（現 株式会社日立製作所 戦略企画室部長）、同統括本部 システムアーキテクチャ研究部 佐藤達広博士（現 株式会社日立製作所 サービス&プラットフォームビジネスユニット デジタルソリューション推進本部 主任技師）、崎川修一郎氏に深謝の意を表す。

第5章に関して、株式会社日立製作所 社会ビジネスユニット 交通情報システム本部 交通第四システム部部長 岡田健一郎氏、同本部 若宮崇氏には研究の機会を与えて戴くと共に技術の実用化の観点からご指導と懇切丁寧なご討論を戴いた。ここに深謝の意を表す。

第6章に関して、株式会社日立製作所 社会ビジネスユニット 交通情報システム本部 交通第四システム部担当部長 上木暢高氏、同本部 交通第二システム部 チーフプロジェクトマネジャー 高山 光幸氏、同本部主任技師 坂本調氏、同本部主任技師 岩村篤樹氏、日立システムズ 社会システム第一本部主任技師 松田和則氏には研究の機会を与えて戴くと共に、技術の実用化の観点からご指導と懇切丁寧なご討論を戴いた。ここに深謝の意を表す。

上司として本研究の機会を与えて戴くと共に、本論文の執筆にあたって多大なるご配慮とご支援を賜った、株式会社日立製作所 テクノロジーイノベーション統括本部 システムイノベーションセンタ長 池田尚司博士、同センタ システムアーキテクチャ研究部部長 志村明俊博士に深謝の意を表す。

本研究を推進するにあたり、鉄道システムの研究グループの一員として多様な観点からのご討論を戴くと共に、多大なるご配慮とご支援を戴きました、株式会社日立製作所 テクノロジーイノベーション統括本部 システムアーキテクチャ研究部主任研究員 皆川剛氏、同研究員 加藤祐子氏、同研究員 木村恵二博士、同企画員 前川勇樹氏に深謝の意を表す。

長期にわたり本論文の執筆を応援して戴いた、株式会社日立製作所 テクノロジーイノベーション統括本部 システムアーキテクチャ研究部 シス A1 研究ユニットの皆様に深謝の意を表す。

最後に、本研究および本論文の執筆における活動全般について陰ながら支えてくれた、夫 裕之、母、父、義母ならびに義父に深謝の意を表す。

## 参考文献

- [1] ARUP, “Future of Rail 2050,” pp.13-17, 2015
- [2] 総務省, “平成 27 年版情報通信白書 特集テーマ 「ICT の過去・現在・未来」,” p. 251
- [3] 杉原顕, “新幹線運転管理システム (COMTRAC) ,” 電気学会雑誌, Vol. 95, No. 8, pp. 711-714, 1975.
- [4] 宮島 弘志, “運行管理システムの変革”, Technical review, JR East No.5, pp.12-20, 2003.
- [5] 北原丈夫, 岩本孝雄, 伊藤総, 藤原和紀, 藤原道雄, “超高密度鉄道の列車群を自律分散制御する東京圏輸送管理システムの開発,” 電気学会論文誌 D, Vol.118, No. 4, pp.534-541 , 1998.
- [6] 谷津 和宏, 菊池 弘明, 安河内 崇, 小川 徹也, 崎川 修一郎, 呉松 沙織 : 東京圏輸送管理システム (ATOS) における提案型運転整理機能の開発, 電気学会研究会資料. ITS, ITS 研究会 2010(42), pp.23-27, 2010-11-01, 2010.
- [7] 豊樹誠, 田辺均, “新幹線総合システム(COSMOS)の変遷 (特集 信号・運行管理),” JREA, Vol. 58, No.8, 2015.
- [8] 渡辺典秋, “地下鉄における自動運転の現状と将来展望,” 電気学会論文誌, Vol. 123, No. 1, 2003.
- [9] 小田篤史, 新美行男, 牧健太郎, “列車自動停止制御装置の自動調整機能の開発,” 電気学会論文誌 D, Vol. 136, No. 9, pp. 629-634, 2016.
- [10] Taketoshi Kunimatsu, Chiaki Hirai, “Methods for Analyzing Passenger Flows During Train Traffic Disruption Using Accumulated Passenger Data,” QR of RTRI, Vol. 55, No. 2, pp. 86-90, 2014.
- [11] 電気学会・鉄道における運行計画・運行管理業務高度化に関する調査専門委員会編 : 「鉄道ダイヤ回復の技術」, p.192 , 2010.
- [12] 富井規雄, “鉄道のスケジューリングアルゴリズムー現状と今後の課題ー,” オペレーションズ・リサーチ, Vol. 49, No. 1, pp. 33-39, 2004.
- [13] 富井規雄, “鉄道のスケジューリングアルゴリズムーコンピュータで運行計画をつくる,” 鉄道総合技術研究所運転システム研究室, エヌ・ティー・エス, 2006.



- [14] 今泉淳, “日本の鉄道車両運用計画作成のための数理モデルに関する概観,” 経営論集, Vol. 89, pp. 21-33, 2017.
- [15] 石塚弘道, “車両のメンテナンス,” 第 20 回鉄道総研講演会, 2007.
- [16] Shift2Rail, <https://shift2rail.org/>
- [17] T.Tomiyama and T.Sato, “An Analysis Method for Service Process Considering Resource Operation Rules,” proceedings of the IEEE International Conference on Social Computing, pp.595-600, 2010
- [18] Caprara, A., L.G. Kroon, M. Monaci, M. Peeters, and P. Toth, “Passenger railway optimization,” Chap. 3. In Handbooks in operations research and management science, Amsterdam: Elsevier. Vol. 14, Chap. 3, pp.129–187, 2007.
- [19] Julie Jespersen-Groth, Daniel Potthoff, Jens Clausen, Dennis Huisman, Leo Kroon, Gábor Maróti, and Morten Nyhave Nielsen, “Disruption Management in Passenger Railway Transportation,” Robust and Online Large-Scale Optimization, Volume 5868 of the series Lecture Notes in Computer Science, pp 399-421, 2007.
- [20] Sundaravalli Narayanaswami, Narayan Rangaraj, “Scheduling and Rescheduling of Railway Operations: A Review and expository Analysis,” Technology Operation Management, Volume 2, Issue 2, pp 102–122, 2011.
- [21] Jørgen Haahr, Richard M. Lusby, “Integrating rolling stock scheduling with train unit shunting,” European Journal of Operational Research, Volume 259, Issue 2, pp.452-468, 2017.
- [22] Luis Cadarso, Ángel Marín, “Improving robustness of rolling stock circulations in rapid transit networks,” Computers & Operations Research, Vol. 51, pp.146-159, 2014.
- [23] G. Maróti and L. G. Kroon., “Maintenance Routing for Train Units: the Transition Model,” Transportation Science, Vol. 39, No. 4, pp.518–525, 2005.
- [24] Shiwei He, Rui Song, Sohail S. Chaudhry, “Fuzzy dispatching model and genetic algorithms for railyards operations,” European Journal of Operational Research, Vol.124, pp.307-331, 2000.
- [25] Zhiyuan Lin, Raymond S.K. Kwan, “A branch-and-price approach for solving the train unit scheduling problem,” Transportation Research Part B: Methodological, Volume 94, pp.97-120, 2016.

- [26] Valentina Cacchiani, Alberto Caprara, Paolo Toth, “A Lagrangian heuristic for a train-unit assignment problem,” *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 161, Issue 12, pp.1707-1718, 2013.
- [27] M. Peeters and L.G. Kroon., “Circulation of Railway Rolling Stock: a Branch-and-Price Approach,” *Computers & Operations Research*, Vol. 35, No. 2, pp.538–556, 2008.
- [28] Lingaya, N., Cordeau, J. F., Desaulniers, G., Desrosiers, J., & Soumis,F., “Operational car assignment at VIA Rail Canada,” *Transportation Research Part B Methodological* , Vol. 36, No.9, pp.755-778, 2002.
- [29] Giovanni Luca Giacco. Donato Carillo., Andrea D’Ariano, Dario Pacciarelli, Ángel G. Marín, “Short-term Rail Rolling Stock Rostering and Maintenance Scheduling,” *Transportation Research Procedia*, Volume 3, pp.651-659, 2014.
- [30] Giovanni Luca Giacco, Donato Carillo, Andrea D’Ariano, Dario Pacciarelli, Ángel Marín, “Short-term rolling stock rostering and maintenance scheduling,” *Transportation Research Procedia*, Volume 3, pp.651-659, 2014.
- [31] Tatsushi Nishi, Akiyoshi Ohno, Masahiro Inuiguchi, Satoru Takahashi, Kenji Ueda, “A Combined column generation and heuristics for railway short-term rolling stock planning with regular inspection constraints,” *Computers & Operations Research*, Volume 81, pp. 14–25, 2017.
- [32] Javier Andrés, Luis Cadarsob,Ángel Marín, “Maintenance Scheduling in Rolling Stock Circulations in Rapid Transit Networks,” *Transportation Research Procedia* 10, pp.524-533, 2015.
- [33] Yung-Cheng (Rex) Lai, Shao-Wei Wang, and Kwei-Long Huang, “Optimized Train-Set Rostering Plan for Taiwan High-Speed Rail,” *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol.14, Issue 1, pp.286-298, 2017.
- [34] Giovanni Luca Giacco, Andrea D’Ariano and Dario Pacciarelli, “Rolling Stock Rostering Optimization Under Maintenance Constraints,” *Journal of Intelligent Transportation Systems Technology, Planning, and Operations*, Volume 18, Issue 1, pp.95-105, 2014.
- [35] A. Alfieri, R. Groot, L. Kroon, and A. Schrijver , “Efficient Circulation of Railway Rolling Stock.,” *Transportation Science*, Volume 40, Issue 3, pp.378-391, 2006.

- [36] Abbink, E.J.W., van den Berg, B.W.V., Kroon, L.G., & Salomon, M. , “Allocation of Railway Rolling Stock for Passenger Trains,” *Transportation Science*, Volume 38, pp.33–42, 2004.
- [37] 今泉 淳, “鉄道の運用計画問題に対する整数計画法によるアプローチ,” *オペレーションズリサーチ*, Vol.53, No.8, pp.439-445, 2008.
- [38] Jean-Franc'ois Cordeau, Franc'ois Soumis, Jacques Desrosiers, “A Benders Decomposition Approach for the Locomotive and Car Assignment Problem,” *Transportation Science*, Vol.32, No.2, pp.133-149, 2000.
- [39] Jean-Franc'ois Cordeau, Franc'ois Soumis, Jacques Desrosiers, “Simultaneous Assignment of Locomotives and Cars to Passenger Trains,” *Operations Research*, Vol.49, No.4, pp.531-548, 2001.
- [40] Dennis Huisman, Richard Freling, Albert P.M.Wagelmans, “Multiple-Depot Integrated Vehicle and Crew Scheduling,” *Transportation Science*, Vol.39, No.4, pp.491-502, 2005.
- [41] J. Desrosiers, Y. Dumas, M.M. Solomon, and F. Soumis , “Time constrained routing and scheduling,” In *Handbooks in OR & MS*, volume 8, pages 35{139. Elsevier, 1995.
- [42] P.-J. Fioole, L.G. Kroon, G. Maroti, and A. Schrijver, “A rolling stock circulation model for combining and splitting of passenger trains,” *European Journal of Operational Research*, Volume 174, pp.1281-1297, 2006.
- [43] Valentina Cacchiania, Dennis Huismanb, Martin Kidda, Leo Kroonb, Paolo Totha, Lucas Veelenturfb, Joris Wagenaarb, “An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling,” *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 63, pp. 15-37, 2014.
- [44] Monize Sâmara Visentini, Denis Borenstein Email author , Jing-Quan Li, Pitu B. Mirchandani, “Review of real-time vehicle schedule recovery methods in transportation services,” *Journal of Scheduling*, Volume 17, Issue 6, pp 541-567, 2014.
- [45] Joris C. Wagenaar, Leo G. Kroon and Marie Schmidt , “Maintenance Appointments in Railway Rolling Stock Rescheduling,” *Transportation Science, Articles in Advance*, pp. 1-23, 2017.
- [46] Luis Cadarso, Ángel Marín, “Integration of timetable planning and rolling stock in rapid transit networks,” *Annals of Operations Research*, Volume 199, Issue 1, pp.113-135, 2012.

- [47] L.K. Nielsen, L.G. Kroon, and G. Maroti, “A rolling horizon approach for disruption management of railway rolling stock,” *European Journal of Operational Research*, 220:496-509, 2012.
- [48] Budai, G., G. Maróti, R. Dekker, D. Huisman, and L. Kroon, “Rescheduling in passenger railways: The rolling stock rebalancing problem,” *Journal of Scheduling* Vol. 13, No. 3, pp.281–297, 2010.
- [49] Thorlacius, P., Larsen, J., & Laumanns, M., “An integrated rolling stock planning model for the Copenhagen suburban passenger railway,” *Journal of Rail Transport 2 Planning & Management*, Vol. 5, No. 4, pp. 240-262, 2015.
- [50] B. Adenso-Daz, M. Oliva Gonzalez, and P. Gonzalez-Torre, “On-line timetable rescheduling in regional train services,” *Transportation Research Part B*, Volume 33, pp.387-398, 1999.
- [51] Nielsen, L.K., *Rolling Stock Rescheduling in Passenger Railways*, Ph.D. thesis, Erasmus University, Rotterdam, The Netherlands, 2011.
- [52] Lars Kjær Nielsen, “A decision support framework for rolling stock rescheduling,” Technical report, ARRIVAL Project, 2008.
- [53] Lars Kjær Nielsen, Leo Kroon, Gábor Maróti, “A Rolling Horizon Approach for Disruption Management of Railway Rolling Stock,” *European Journal of Operational Research*, Vol. 220, No. 2, pp.496-509, 2012.
- [54] Keisuke Sato and Naoto Fukumura, “Real-time freight locomotive rescheduling and uncovered train detection during disruption,” *European Journal of Operational Research*, Volume 221, Issue 3, pp.636-648, 2012.
- [55] Tatsuhiro Sato, Shuichiro Sakikawa, Toyohisa Morita, Nobutaka Ueki, and Tomohiro Murata, “Crew and Vehicle Rescheduling Based on a Network Flow Model and Its Application to a Railway Train Operation,” *IAENG International Journal of Applied Mathematics*, Volume 39, 2009.
- [56] J. Jespersen Groth and J. Clausen, “Optimal Reinsertion of Cancelled Train Lines,” Technical Report Report-2006-13, Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, August 2006.
- [57] L.P. Veelenturf, L.K. Nielsen, G. Maroti, and L.G. Kroon. “Passenger oriented disruption management by adapting stopping patterns and rolling stock schedules,”

- In Proceedings of the 4th International, Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis – RailRome, 2011.
- [58] Luis Cadarso, Angel Marin, Gabor Maroti, “Recovery of disruptions in rapid transit networks,” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Volume 53, pp.15-33, 2013
- [59] Joris Wagenaar, Leo Kroon and Ioannis Fragkos, “Rolling stock rescheduling in passenger railway transportation using dead-heading trips and adjusted passenger demand,” *Transportation Research Part B: Methodological* Volume 101, pp.140-161, 2017.
- [60] M. Almodovar and R. Garcia-Rodenas, “On-line reschedule optimization for passenger railways in case of emergencies,” *Computers & Operations Research*, Volume 40, Issue 3, pp.725-736, 2013.
- [61] Leo Kroon, Gabor Maroti and Lars Nielsen, "Rescheduling of Railway Rolling Stock with Dynamic Passenger Flows," *Transportation Science*, Volume 49 Issue 2, pp.165-184, 2015.
- [62] H.P. Williams, 小林 英三, “数理計画モデルの作成法,” 産業図書, 1995.
- [63] Chryssi MalandrakiOpens, Robert B. Dial, “A restricted dynamic programming heuristic algorithm for the time dependent traveling salesman problem,” *European Journal of Operational Research*, Volume 90, Issue 1, pp. 45-55, 1996
- [64] Ton Volgenant, Roy Jonker, “A branch and bound algorithm for the symmetric traveling salesman problem based on the 1-tree relaxation,” *European Journal of Operational Research*, Volume 9, Issue 1, pp. 83-89, 1982
- [65] Jeroen B.J.M. De Kort, “A branch and bound algorithm for symmetric 2-Peripatetic Salesman Problems,” *European Journal of Operational Research*, Volume 70, Issue 2, pp. 229-243, 1993.
- [66] 山村雅幸, 小野貴久, 小林重信, “形質の遺伝を重視した遺伝的アルゴリズムに基づく巡回セールスマン問題の解法,” *人工知能学会論文誌*, Vol.7, No.6, pp.117-127, 1992.
- [67] Jean-Yves Potvin, “Genetic algorithms for the traveling salesman problem,” *Annals of Operations Research*, Vol. 63, pp. 339-370, 1996.
- [68] 前川景示, 玉置久, 喜多一, 西川韓一, “遺伝アルゴリズムによる巡回セールスマン問題の一解法,” *計測自動制御学会論文集*, Vol.31, No.5, pp.598-605, 1995.

- [69] 永田 裕一, “局所的多様性の損失を考慮した評価関数を用いた GA の TSP への適用,” 人工知能学会論文誌, Vol.21, No.2, pp.195-204, 2006.
- [70] Marco Dorigo, Luca Maria Gambardella , “Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem,” IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 1, No. 1, pp. 53-66, 1997.
- [71] Marco Dorigo, Mauro Birattari, Thomas Stutzle , “Ant colony optimization,” IEEE Computational Intelligence Magazine, Vol. 1, No. 4, pp. 28-39, 2006.
- [72] 亀田陽介, 狩野均, “局所最適解をフェロモン初期化に用いたアントコロニー最適化法による T S P の解法,” 情報処理学会研究報告数理モデル化と問題解決 (MPS) , No. 19, pp.109-112, 2007.
- [73] Haitao Li, Bahram Alidaee, “Tabu search for solving the black-and-white travelling salesman problem,” Journal of the Operational Research Society, Volume 67, Issue 8, pp 1061–1079, 2016.
- [74] Yoshikane Takahashi, “Solving a Dynamic Traveling Salesman Problem with an Adaptive Hopfield Network,” Complex Systems, Vol.10, Issue 6, pp.449–466, 1996.
- [75] Chunni Zhong, Chaomin Luo, Zhenzhong Chu and Wenyang Gan, “A continuous hopfield neural network based on dynamic step for the traveling salesman problem,” 2017 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), pp.3318-3323, 2017
- [76] Gilbert Laporte , “The Vehicle Routing Problem - An Overview of Exact and Approximate Algorithms,” European Journal of Operational Research, Vol. 59, pp. 345-358, 1992.
- [77] Barrie M. Baker, M.A. Ayeche, “A genetic algorithm for the vehicle routing problem,” Computers & Operations Research, Volume 30, Issue 5, pp. 787-800, 2003.
- [78] Jacques Renaude, Gilbert Laporte, F. Boctor , “A tabu search heuristic for the multi-depot vehicle routing problem,” Computers & Operations Research, Volume 23, Issue 3, pp. 229-235, 1996.
- [79] Michael Wasner, Günther Zäpfel , “An integrated multi-depot hub-location vehicle routing model for network planning of parcel service,” International Journal of Production Economics, Volume 90, Issue 3, pp. 403-419, 2004.

- [80] B Yu, Z-Z Yang, J-X Xie, “A parallel improved ant colony optimization for multi-depot vehicle routing problem,” *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 62, Issue 1, pp 183–188, 2011.
- [81] C. Hane, C. Barnhart, E. Johnson, R. Marsten, G. Nemhauser, and G. Sigismondi, “The fleet assignment problem: Solving a large-scale integer program,” *Mathematical Programming*, 70:211–232, 1995.
- [82] Barnhart, C., N. L. Boland, L. W. Clarke, E. Johnson, G. L. Nemhauser, R. G. Sheno, “Flight string models for aircraft fleet and routing,” *Transportation Science*, Vol. 32, No. 3, pp. 208–220, 1998.
- [83] Feo, T. A., J. F. Bard, “Flight scheduling and maintenance base planning,” *Management Science*, Vol. 35, No. 12, pp. 1514–1532, 1989.
- [84] Jean-François Cordeau, Goran Stojković, François Soumis, Jacques Desrosiers, “Benders Decomposition for Simultaneous Aircraft Routing and Crew Scheduling,” *Transportation Science, INFORMS*, Vol. 35, No. 4, pp. 375–388, 2001.
- [85] Kohl, N., Larsen, A., Larsen, J., Ross, A., & Tiourine, S., “Airline disruption management—perspectives, experiences and outlook,” *Journal of Air Transport Management*, Vol. 13, No. 3, pp. 149–162, 2007.
- [86] Jens Clausen, Allan Larsen, Jesper Larsen, Natalia J. Rezanova, “Disruption management in the airline industry—Concepts, models and methods,” *Computers & Operations Research*, Vol. 37, No. 5, pp. 809-821, 2010.
- [87] 藤江 哲也, “整数計画問題に対する分枝カット法とカットの理論,” *日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌*, Vol.48, No.12, pp.935-940, 2003.
- [88] 片山謙吾, 成久洋之, “遺伝的反复局所探索法とその最適化性能,” *電子情報通信学会論文誌 A*, Vol. J83-A, No.2, pp.179-187, 2000.
- [89] 安田恵一郎, 神内宏幸, 石亀篤司, “距離に基づく相互作用を用いた多点探索型組合せ最適化手法,” *電気学会論文誌 C*, Vol.130, No.1, pp.6-13, 2010.
- [90] 金澤貴彦, 安田恵一郎, “組合せ最適化問題の解空間における上位構造に基づくメタヒューリスティクスの基礎検討,” *電気学会論文誌 C*, Vol.131, No.4, pp.934-935, 2011.
- [91] 花田良子, 廣安知之, 三木光範, “組合せ最適化問題における内挿/外挿的な領域への遺伝的多段階探索の有効性,” *情報処理学会論文誌*, Vol.47, No.10, pp.2897-2908, 2006.

- [92] 森田 真英, 落合 広樹, 田村 健一, 土屋 淳一, 安田 恵一郎, “相関係数を用いた近接最適性の評価に基づく組合せ最適化手法,” 電気学会論文誌 C, Vol.135, No.4, pp.466-467, 2015.
- [93] 重弘裕二, 増田達也, “解空間の確率モデルに基づいた大規模問題に対する組合せ最適化手法,” 電気学会論文誌 C, Vol.137, No.8, pp.1090-1101, 2017.
- [94] 富山友恵, 佐藤達広, 森田豊久, 佐々木敏郎, “ネットワーク表現を用いた作業計画向け割当条件分析手法の提案,” 電気学会論文誌 C, Vol.129, No.11, pp.2083-2090, 2009.
- [95] 茨木俊秀, 福島雅夫, “最適化の手法,” 共立出版, 1993.
- [96] Gurobi, <http://www.gurobi.com/>
- [97] J.Lustig and J.F.Puget : "Program Does Not Equal Program : Constraint Programming and Its Relationship to Mathematical Programming," Interfaces, Vol.31, No.6, pp.29-53, 2001.



## 研究業績一覧

### 学術論文誌論文

1. ○T.Tomiyama, T.Sato, K.Okada, T.Wakamiya, and T.Murata, “Railway Rolling-Stock-Assignment-Scheduling Algorithm for Minimizing Inspection Cost,” IAENG International Journal of Applied Mathematics, vol. 48, no. 2, pp.228-237, 2018
2. T.Tomiyama, T.Sato, T.Murata, S.Iwamura and O.Sakamoto, “Development of Reactive Scheduling for Rolling Stock Operation using a Constraint Model,” Electrical Engineering in Japan, Vol.203, Issue 4, pp.31-44, 2018 (No.4 の英訳)
3. T.Yamada, T.Sato, T.Tomiyama and N.Ueki, “Interactive system with explanation function for real-time railway crew Rescheduling,” Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.12, Issue S2, pp.S56-S66, 2017
4. ○富山友恵, 佐藤達広, 村田智洋, 岩村篤樹, 坂本調, “車両運用の制約モデルを用いた編成行路計画リスケジューリング手法の開発”, 電気学会論文誌C, Vol.137, No.8, pp.1121-1131, 2017
5. T.Sato, T.Tomiyama, T.Morita and T.Murata, “A Lagrangian Relaxation Method for Crew and Vehicle Rescheduling of Railway Passenger Transportation and its Application,” 電気学会論文誌C, Vol.132-C, No.2, pp.260-268, 2012
6. 富山友恵, 佐藤達広, 森田豊久, 佐々木敏郎, “ネットワーク表現を用いた作業計画向け割当条件分析手法の提案,” 電気学会論文誌C, Vol.129-C, No.11, pp.2083-2090, 2009

### 国際学会（査読付き）

1. T.Yamada, Y.Kato, Y.Maekawa and T.Tomiyama, “Interactive Service for Visualizing Data Association Using a Self-Organizing Structure of Schemas,” IEEE 10th International Conference on Service-Oriented Computing and Applications, Kanazawa, Japan, IEEE, pp.230-233, 2017
2. T.Yamada, T.Sato, T.Tomiyama and N.Ueki, “Real-Time Railway Crew Rescheduling: Performance Support with Explanations, Conference on 2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Kowloon, China, IEEE, pp.1005-1010, 2015

3. ○T.Tomiyama, T.Sato and T.Murata, “Development of a Rescheduling method for Operating Train Units based on an Extended Train Operation Network Model,” The International Conference on Engineering, Technology and Applied Sciences, Taipei, Taiwan, pp.213-224, 2015
4. ○T.Tomiyama, T.Sato, K.Okada and T.Wakamiya, “Rescheduling Algorithm Using Operational Patterns for Rolling Stock Operation at TrainDepots,” proceedings the 13th International Conference on Design and Operation in Railway Engineering(Computers in Railways XII), New Forest, UK, WIT Press, pp.555-566, 2012
5. ○T.Tomiyama and T.Sato, "An Analysis Method for Service Process Considering Resource Operation Rules,” proceedings of the IEEE International Conference on Social Computing, Minneapolis, MN, USA, pp.595-600, 2010
6. T.Sato, T. Tomiyama, T.Morita and T. Murata, “Lagrangian Relaxation Method for Network Flow Modeled Crew and Vehicle Rescheduling,” proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Advanced Computer Control, Shenyang, China, IEEE, Vol.1, pp.403-408,2010

#### 国内学会

1. 矢野浩仁, 富山友恵, 渡邊慶彦, “鉄道と道路交通シミュレーションの連携方式の検討,” 電気学会 第 73 回情報システム研究会, 2018
2. 前川勇樹, 富山友恵, 佐藤達広, “計画間の整合条件を生成する連結ネットワークモデルを用いた列車ダイヤと構内入換計画の相互連携方式の提案,” マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム(DICOMO), 2107
3. 山田隆亮, 佐藤達広, 富山友恵, 上木暢高, “対話型乗務員運用整理向け業務支援システムについての一考察,” 電子・情報・システム部門 情報システム研究会, 2015
4. ○富山友恵, 佐藤達広, 岩村篤樹, 坂本調, 松田和則, “制約プログラミングを用いた滞泊制約付き車両運用整理手法の開発,” 平成 24 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, pp.267-270, 2012
5. 佐藤達広, 富山友恵, 松尾雅一, “鉄道車両基地における構内入換計画支援システムの開発,” 第 25 回電気学会産業応用部門大会, 電気学会, 2011
6. ○富山友恵, 佐藤達広, 森田豊久, 佐々木敏郎, “グラフ表現を用いた作業計画向け割当て条件分析手法の提案,” 電気学会 電子・情報・システム部門大会論文集, pp.987-992,2008

その他（登録特許）

1. P06122967（日本），計画連携システムおよび計画連携方法（2017）
2. P05869276（日本），PZL201280038411.9（中国），P2762382（欧州，ドイツ，イタリア），資源運用計画作成装置及びその方法（2015, 2016, 2017）
3. P05618857（日本），資源運用計画作成装置および資源運用計画作成方法（2014）
4. P05224248（日本），作業実行条件策定支援装置及び作業実行条件策定支援方法（2013）
5. P05174746（日本），運用計画再作成装置及び方法（2013）