

要員数最小化を目的とした乗務員運用計画の自動作成手法

加藤 怜* 中東 太一** 小久保 達也*

Automated Crew Scheduling Method to Minimize the Number of Crew Required

Satoshi KATO Taichi NAKAHIGASHI Tatsuya KOKUBO

Railway companies produce crew schedules when they revise their train timetables. Currently, these schedules are produced manually by experts. However, this manual task is time-consuming. It is therefore necessary to develop a system that supports crew scheduling using an automated algorithm. We propose an automated crew scheduling algorithm based on mathematical optimization to minimize the number of crew required. The results of a computational experiment using real data from a railway line confirmed that the proposed algorithm can quickly generate an efficient crew schedule in terms of the number of crew required.

キーワード：乗務員運用計画，要員数，行路，交番，数理最適化，列生成法

1. はじめに

ダイヤ改正時には、列車ダイヤのみならず、付随する様々な計画を作成する必要がある。そのなかの1つである乗務員運用計画は、運転士および車掌のスケジュールを示すが、リソースの有効活用の観点から、なるべく必要となる乗務員数（以下、「要員数」）が少ない計画を作成することが求められる。一方で、乗務員運用計画は乗務員の勤務計画の側面を含むことから、就業規則等の規程類に基づく多数の制約条件を満たす必要がある¹⁾。

現在、多くの鉄道事業者において、乗務員運用計画は熟練した担当者の手作業により作成されている。しかし、その作業には多くの知識と経験を必要とし、熟練の担当者でも1路線あたり数日～数週間程度を要している。そのため、担当者の省力化、脱技能化の観点から、計画の自動作成のニーズは高い。また、自動作成手法の構築にあたっては、運転士、車掌の違いを考慮できるほか、列車本数や乗務員区所数などに依存しないなど様々な路線に適用可能な汎用性が求められる。

そこで本稿では、ダイヤ改正時を対象とした、汎用性の高い乗務員運用計画の自動作成手法を提案する。提案手法では数理最適化²⁾を適用し、問題を2つに分ける二段階法を考案することで、短時間で要員数を最小とする計画の作成を可能としている。さらに、国内の実路線データを用いたケーススタディにより、提案手法の性能を検証した結果についても報告する。

2. ダイヤ改正時の乗務員運用計画の作成

2.1 行路と交番

ダイヤ改正時には、列車ダイヤ、車両運用計画をもとに、乗務員運用計画を作成する。乗務員運用計画は、所与の列車ダイヤ上の全列車に不足なく乗務員を充当し、乗務員の勤務計画を定めるものである。具体的には、「行路」と「交番」の2つの計画により構成される。

行路とは、乗務員の1回の勤務における乗務行程を示し、1営業日内に終了する「日勤行路」および2営業日にまたがる「泊まり行路」の2種類が存在する。各行路は、路線上に配置してあるいずれかの乗務員区所から開始し、同一の乗務員区所で終了する必要がある。また、拘束時間や労働時間など、法令や就業規則をはじめとする規程類に基づく多数の条件を満たす必要がある。

交番とは、行路の実施順序を定め、適切な箇所に休日挿入したものを示し、毎月作成する乗務員の勤務表の基本となる。また、交番は乗務員区所ごとに作成するが、2つの行路間には前の行路の内容に応じた適切な休養時間（以下、「在宅休養時間」）を確保する、交番全体で所定の休日を付与するなど、様々な条件を考慮する必要がある（行路、交番の制約条件の詳細は次節で述べる）。

乗務員には運転士、車掌が含まれる。運転士は本線列車の乗務に加えて、車両基地での出入区作業や駅での入換作業を行う必要がある一方、車掌には終着駅にて車内の点検作業等が必要な場合があるなど、実施すべき作業が異なる。また、車掌は回送列車については乗務の省略が可能な場合も多く、一方で長編成の優等列車などでは複数人の充当が必要な場合があるなど、運転士と車掌とでは各列車に充当が必要な人数も異なる。

図1に、全14列車の列車ダイヤと車両運用計画の例を示す。A駅およびB駅が乗務員区所の最寄り駅であ

* 信号技術研究部 運転システム研究室

** 元 信号技術研究部 運転システム研究室

り、それぞれA区所、B区所とする。図中の○は車両の車両基地からの出区、△は車両基地への入区、A駅とC駅で列車同士をつなぐ線は折返し運用を意味する。図2には、図1を基に作成された行路を示す。A区所は行路1および2の2つ、B区所は行路3～6の4つの行路が作成されている。行路1, 3, 4は日勤行路、行路2, 5, 6は泊まり行路である。なお、行路2および3の点線は列車乗務を担当しない移動を意味し、「便乗」と呼ぶ。便乗は非効率とみなされるため、少ない方が望ましい。

図3は、図2の行路に対応するB区所の交番の例である。上部の数值は日数を表し、4つの行路の実施順序および休日(特休および公休)挿入箇所を定めている。全体で9日間の循環計画であり、9日目の次は1日目に戻る。交番日数はその計画の実施に必要な要員数を意味し、この例のB区所では9人となる。

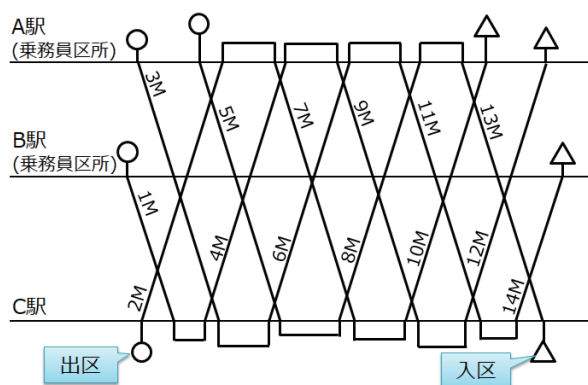


図1 列車ダイヤおよび車両運用計画の例

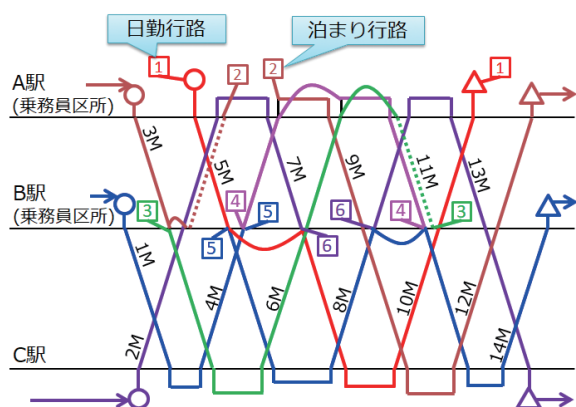


図2 乗務員運用計画(行路)の例

日数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
勤務	行路4 日勤	行路3 日勤		行路6 泊まり		行路5 泊まり			
開始時刻	9:30	8:00	公休	14:00	-	9:00	-	特休	公休
終了時刻	17:00	16:30		-	12:00	-	9:30		

図3 乗務員運用計画(交番)の例

2.2 制約条件と評価指標

行路、交番の作成にあたっては、規程類に示される多数の制約条件を考慮する必要がある。以下に、本稿で考慮する制約条件の詳細を示す。

2.2.1 行路作成の制約条件

- ダイヤ上の全列車、全区間に対し、いずれかの行路を割り当てる。
- 各乗務員区所において、1日当たり平均労働時間は設定値以下とする。なお、1日当たり平均労働時間とは、交番上の合計の労働時間を、日勤行路を1、泊まり行路を2とした合計で定義する「勤務日数」で割った時間を意味する。
- 各滞泊箇所について、使用する泊まり行路数は設定値以下とする。
- 各乗務員区所の勤務日数は、設定値以下とする。
- 各行路は、いずれかの乗務員区所から開始し、同一の乗務員区所で終了する。
- 各行路の拘束時間は設定値以下とする。上限は、日勤行路と泊まり行路で異なる。なお、拘束時間とは、開始時刻から終了時刻までの時間を指す。
- 各行路の労働時間は設定値以下とする。労働時間は、各列車の乗務時間に加え、各乗務の前後に生じる準備時間等も含まれる。
- 各行路の休憩時間は設定値以上とする。休憩時間とは、拘束時間から労働時間を引いたものを指す。
- 各行路では、食事時間(朝・昼・夕)を確保しなければならない。この条件は、特定の時間帯内に必要時間以上を確保するといった形で定義される。
- 各行路の開始時刻および終了時刻は、決められた時間の範囲内で行なければならない。なお、日勤行路と泊まり行路では、可能な時間帯が異なる。
- 乗務員区所ごとに、乗務可能な範囲が存在する。
- 泊まり行路では、睡眠時間を設ける必要があり、その時間は設定値以上とする。
- 1継続乗務時間は設定値以下とする。1継続乗務時間とは、途中の休憩なしに連続して乗務しているとみなす時間を指す。
- ある1継続乗務と次の1継続乗務の間合い時間は、設定値以上かつ設定値以下とする。

2.2.2 交番作成の制約条件

- 作成したすべての行路を交番に含める。
- 必要な年間休日日数を確保する。
- 在宅休養時間は設定値以上とする。休日を挟まない場合、休日を挟む場合、連休を挟む場合のそれぞれで異なる値となる。
- 休日前の勤務終了時刻は、設定時刻以前とする。
- 休日後の勤務開始時刻は、設定時刻以降とする。
- 連続勤務日数の条件を満たす。過度な連勤を防ぎ

適切に休日を挟むための条件であり、複数の条件が設けられることがある。

2.3 既往研究

乗務員運用計画の自動作成に関連する既往研究は多数存在する。Heil et al.³⁾には、既往研究の、計画作成の対象、モデル化の方法、解法が分類されている。国外では行路作成、交番作成のいずれも多く多くの取り組みがあるものの、主たる制約条件である労働条件は、各国の法令等に基づき規定されるため、国内とは考慮すべき項目が大きく異なる。国内では行路作成の取り組みが多く、三浦ら⁴⁾、西ら⁵⁾をはじめ多数の研究があり、これらの研究の多くは数理最適化を適用している。一方で、交番作成に対する取り組みは少なく、坂口⁶⁾、杉山⁷⁾などに限られる。

また、本研究の目的である行路作成と交番作成を一元的に扱う研究は数が限られる。国内では坂口ら⁸⁾の取り組みがあるものの、行路作成後に、作成行路を用いた休日から次の休日までの勤務の連なりを作成対象としていることから、休日を挟む場合の在宅休養時間を考慮していない。よって、要員数はあくまで概算の数値となる。

3. 乗務員運用計画の自動作成手法

3.1 自動作成手法の全体像

本研究では、主目的が要員数の最小化であり、また既往研究でも適用実績が多いことに鑑み、自動作成手法として数理最適化を採用する。

2.1節で述べたように、要員数を算出するためには、交番まで作成しなければならない。よって、厳密に要員数を最小化するためには、行路作成および交番作成を一体として扱い、両者を同時に最適化する「同時解法」のアプローチを採る必要がある。しかし、既往研究でもそれぞれの問題が大規模な組合せ最適化問題であることが示されており、同時解法での解決は非常に困難と考えられる。よって、本稿ではまず行路を作成し、作成した行路を用いて交番を作成する「二段階法」のアプローチを採用する。

本稿が提案する自動作成手法の手順を以下に示す⁹⁾。

Step 1：トリップの作成

入力となる列車ダイヤ、車両運用計画および乗務員の交代（乗継）が可能な列車・駅の情報から、列車乗務の最小単位（以下、「トリップ」と呼ぶ）を作成する。トリップの詳細は3.2節で述べる。

Step 2：行路作成アルゴリズムの適用

行路作成では、数理最適化問題の1つである「集合被覆問題」²⁾として数理モデル化を行い、解法として「列生成法」¹⁰⁾を適用する。詳細は3.3節で述べる。

Step 3：交番作成アルゴリズムの適用

Step 2で得られた行路集合を用いて、交番を作成する。交番作成は数理最適化問題の1つである巡回セールスマン問題（Travelling Salesman Problem, 以下「TSP」）²⁾として数理モデル化を行う。詳細は3.4節で述べる。

本研究では要員数の最小化を主目的としているが、可能な限り労働条件などを考慮した実用的な運用計画を得ることを目指し、Step 2, Step 3の目的関数を以下のように定める。

- Step 2では、勤務日数を最小化する。そのうえで、非効率な労働とみなされる便乗数も低減する。
- Step 3では、交番では特に休日を挟む場面に置いて、在宅休養時間を十分に確保することが望ましいことから、必要な在宅休養時間からの差分（余裕時間に相当）が最も少ない時間を最大化する。

3.2 トリップの作成（Step 1）

自動作成の前処理として、乗務員の担当列車の最小単位である「トリップ」を作成する。具体的な手順としては、車両運用を参照し、乗務員の乗継が可能な箇所を分割し、それぞれをトリップとする。

図4に、運転士のトリップの例を示す。列車ダイヤと車両運用は図1と同様であり、A駅およびB駅で乗務員の乗継が可能である。このとき、C駅では乗務員の乗継はなく、トリップを分割する必要はない。また、3M、5Mの出区のような作業は原則として本線乗務と同一の運転士が実施するため、出入区作業も含めてトリップとする。なお、車掌の行路作成時には、出入区作業を含まないトリップとする。このような運転士と車掌の違いや、線区条件による違いについては、トリップの定義を変更することにより柔軟に対応可能である。

また、このトリップの数が増加すると問題規模が増加するが、運転士の場合、供回り（車両運用との同一の運用を意味する）箇所は分割しないといった工夫をすることで、問題規模を抑制する。

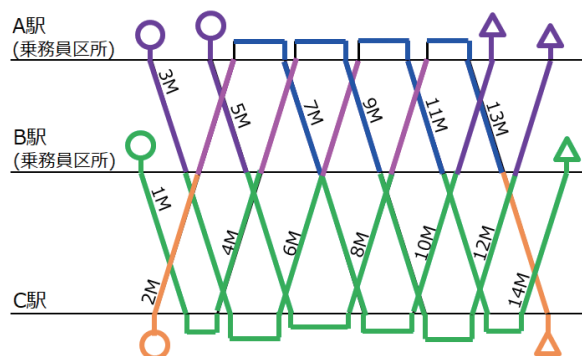


図4 トリップの例

3.3 行路作成アルゴリズム (Step 2)

3.3.1 集合被覆問題および列生成法の概要

3.2節で作成したトリップを複数つなぎ合わせることで、行路を作成する。先述のように、行路作成は集合被覆問題としてモデル化する。集合被覆問題とは、ある集合とその部分集合、および各部分集合に対しコストが与えられたときに、元の集合内の全要素をカバーする、コストの合計が最小の部分集合の集まりを求める数理最適化モデルである。行路作成を集合被覆問題としてモデル化すると、行がトリップ、列が行路に対応する。

行路作成に対する集合被覆問題の係数行列のイメージを図5に示す。この例は、トリップが8個、行路の候補（「行路案」と呼ぶ）が7個の例である。黄色の部分、各行路案が担当するトリップを示す。たとえば、行路案1はトリップ1, 3を担当する（係数が1となっている）。各行路案には青色の部分で示すコストが定義されている。この7個の行路案のなかから複数個選択し、8個いずれのトリップも1個以上の行路案が担当したうえで（そのため右辺が1以上となっている）、コスト最小の行路案集合を求める。この例では、行路案2, 4, 5を選択すると、すべてのトリップを担当したうえで、最小コスト5の計画が得られる。

ここで、最小コストの計画を求めるためには、あらかじめ条件を満たす行路（列）をすべて列挙しておく必要がある。しかし、実用規模路線だと条件を満たす行路は数百万以上におよび、列数が膨大となるため、短時間で求解が難しい。そこで、効率的な行路（列）のみを列挙可能な列生成法を適用する。行路作成に対する列生成法の適用手順を以下に示す。

Step 2-1：初期列（行路）を準備し限定主問題に追加する。

Step 2-2：現在の列を用いて限定主問題を解く。

Step 2-3：Step 2-2の限定主問題の解をもとに、列生成子問題を解き、被約費用が負である列（行路）を生成する。もし被約費用が負の列が見つかった場合は、限定主問題に追加し、Step 2-2へ戻る。さもなければ、列生成を終了し Step 2-4へ進む。

	行路1	行路2	行路3	行路4	行路5	行路6	行路7		
コスト	1	1	2	2	2	2	2		
トリップ1	1			1		1		≥	1
トリップ2		1	1		1			≥	1
トリップ3	1				1		1	≥	1
トリップ4		1	1			1	1	≥	1
トリップ5				1		1		≥	1
トリップ6			1	1				≥	1
トリップ7					1		1	≥	1
トリップ8			1		1	1		≥	1

図5 集合被覆問題の係数行列のイメージ

Step 2-4：これまでの生成列をもとに実行可能解を求める。

3.3.2 限定主問題 (Step 2-1・2-2)

限定主問題とは、一部の列（行路）のみを対象とし、変数を線形緩和した問題を指す。以下に、限定主問題の定式化を示す。表1に使用する記号の定義を示す。

〈目的関数〉

$$\text{Min. } \sum_{k \in K} \sum_{j \in J^k} c_j^k x_j^k + \sum_{i \in I} d_i y_i \quad (1)$$

〈制約条件〉

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in J^k} a_{ij}^k x_j^k - y_i = m_i, \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J^k} (e_j^k - c_j^k f^k) x_j^k \leq 0, \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in J^k} g_j^{kl} x_j^k \leq q^l, \quad \forall l \in L \quad (4)$$

$$\sum_{j \in J^k} c_j^k x_j^k \leq r^k, \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$x_j^k \geq 0, \quad \forall j \in J^k, \forall k \in K \quad (6)$$

$$y_i \geq 0, \quad \forall i \in I \quad (7)$$

表1 使用する記号の定義

記号	定義
K	乗務員区所 k の集合
I	トリップ i の集合
J^k	乗務員区所 k の行路案 j の集合
L	滞泊地 l の集合
a_{ij}^k	乗務員区所 k の行路案 j がトリップ i を乗務する場合1, さもなければ0
c_j^k	乗務員区所 k の行路案 j の勤務日数
d_i	トリップ i の便乗コスト
m_i	トリップ i の必要乗務員数
e_j^k	乗務員区所 k の行路案 j の労働時間
f^k	乗務員区所 k の1日当たり平均労働時間の上限
g_j^{kl}	乗務員区所 k の行路案 j が滞泊地 l を使用する場合1, さもなければ0
q^l	滞泊地 l の使用数の上限
r^k	乗務員区所 k の勤務日数の上限
x_j^k	乗務員区所 k の行路案 j を採択する場合1, さもなければ0
y_i	トリップ i の便乗数

式(1)は目的関数であり、第1項は勤務日数を、第2項は便乗に伴うコストを意味する。式(2)~(7)は制約条件である。式(2)は2.2節の条件a)を意味する。式(3)は条件b)、式(4)は条件c)、式(5)は条件d)を示す。式(6)、(7)は変数の取りうる値の制限を示す。なお、図5の例と比較すると、式(2)で右辺との差分(過剰な割当分)を変数 y_j で便乗数として取得し、それを目的関数式(1)の第2項で反映している点、式(2)の右辺が一律1ではなく m_i としている点、式(3)~(5)が追加されている点、変数 x_j^k が実数となっている点が異なる。

3.3.3 列生成子問題 (Step 2-3)

列生成子問題は、限定主問題の最適解をもとに、新たに追加する列(行路)を求める問題である。そこでは、以下に示す被約費用が負となる列を求める。

$$c_j^k - \sum_{i \in I} a_{ij}^k \pi_i + (e_j^k - c_j^k f^k) \theta^k + \sum_{l \in L} g_{jl}^k \mu^l + c_j^k \rho^k \quad (8)$$

ここで、 π_i 、 θ^k 、 μ^l 、 ρ^k はそれぞれ式(2)~(5)の双対変数であり、限定主問題を解くことで得られる。列は行路を意味するため、生成列は2.2節の条件e)~n)を満たす必要がある。

この問題は、トリップをノード、トリップ間の接続可否をアークで表現したネットワーク上での、制約付き最短路問題としてモデル化できる。この問題の解法として、ラベリング法を適用するにより、短時間で最短路を求めることができる(詳細は文献9を参照)。

3.3.4 実行可能解の算出 (Step 2-4)

列生成法の過程では、変数 x_j^k は線形緩和しているため、実行可能解(変数 x_j^k が整数となる解)を得ることはできない。そこで、列生成法が収束した後に、実行可能解を算出する必要がある。本研究では、西ら⁵⁾の研究をもとにした実行可能解算出アルゴリズムを適用する。列生成が収束した段階で、一部の变数 x_j^k を1に固定する処理を行う。ここで、変数固定は以下の方法に基づく。

- ・収束した段階の限定主問題の最適解において、変数 x_j^k の値が1であるものは、そのすべての値を1に固定する。
- ・値が1である変数 x_j^k が1つもない場合には、最も1に近い変数 x_j^k を1つのみ1に固定する。

変数を固定したのちに、再度3.3.1項のStep 2-2に戻り、列生成を行う。このように、列生成を繰り返し、固定する変数の数を増やしていき、全トリップが含まれた段階で処理を終了する。

3.4 交番作成アルゴリズム (Step 3)

3.4.1 巡回セールスマン問題としてのモデル化

交番作成アルゴリズムでは、3.3節の行路作成アルゴ

リズムで作成した行路を入力とし、2.2節の条件o)~t)を満たす交番を作成する。なお、本稿では特休と公休を区別せず、どちらも「休日」と呼ぶ。また、特休・公休など、休日が連続する場合は「連休」と呼ぶ。

作成した行路をノード、行路間の接続をアークとしたネットワークで表現することで、交番作成をTSPとしてモデル化する。TSPの解の巡回路はすべてのノードを経由するが、それが交番に相当する。すなわち、2.2節の条件o)を充足することができる。

交番上において、2つの行路間は休日を挟まない場合(翌日も行路となる場合)、休日を挟む場合、連休を挟む場合の3通りがあるため、アークは間に休日を挟まない「通常アーク」、休日を挟む「休日アーク」、連休を挟む「連休アーク」の3種類を設ける。よって、2つのノード間には、最大3種類のアークが張られる。ただし、条件q)~s)のいずれかの条件を満たさない場合は、当該のアークを張らない。3.1節で述べたように、評価指標としては休日を挟む在宅休養時間について、必要時間からの差分が最も少ない時間を最大化する。そのため、各アークのコストは、通常アークの場合は0、休日アーク、連休アークの場合は在宅休養時間の必要時間からの余裕時間を設定する。

図6にTSPのネットワークの例を示す。この例は、図2のB区所の行路が与えられたものである。行路3~6がそれぞれノード3~6に対応している。各行路間で、3種類のアークそれぞれが設定できる場合に限り、アークが張られている。この4つのノードいずれも1回のみ経由し、かつコスト最小の巡回路を求める。

3.4.2 TSPとしての定式化

以下に、数理最適化問題としての定式化の概略を示す(詳細は文献9を参照)。

〈目的関数〉

休日場面における在宅休養時間の余裕時間の最大化

〈制約条件〉

- ・各行路を1回のみ巡回路に含める

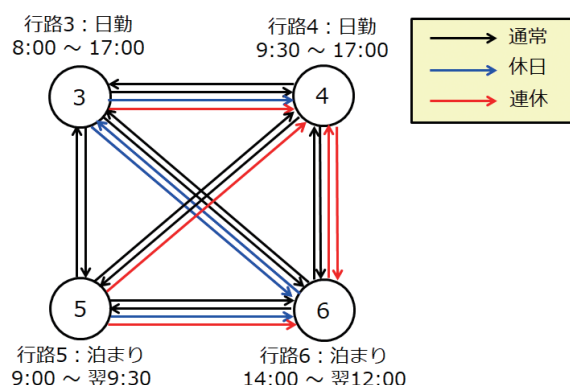


図6 TSPのネットワークの例

- ・部分巡回路²⁾の除去
- ・連続勤務日数の条件
- ・必要な休日日数の確保
- ・変数の取りうる範囲

4. ケーススタディ

4.1 対象路線と検証方法

提案手法の性能を評価するため、運転士、車掌のそれぞれについて、国内の存在する2つの路線データを用いて検証する。各路線の概略図を図7に示す。路線Iでは車掌を対象とし、乗務員区所はB駅、E駅に隣接して2つあり、この2駅を含め計7駅が滞泊地となる。路線IIでは運転士を対象とし、乗務員区所はJ駅隣接の1つであり、J駅を含め計7駅が滞泊地となる。

また、表2には問題規模の情報として、乗務員区所数、列車本数、トリップ数を示す。いずれも列車本数が400本以上と比較的規模の大きな路線である。区所数、列車本数をみるといずれも路線Iが多いが、路線Iの列車には多数の回送列車が含まれており、当該路線の回送列車は車掌の乗務が省略可能であるため（便乗は可）、問題規模としては路線IIの方が大きい。また、路線Iの2区所はそれぞれ異なる乗務可能範囲が指定されている。

提案手法の性能は、勤務日数等の評価指標および計算時間により評価する。ここで評価指標は、自動作成した運用と、実際の運用とを比較する。検証には、OSがWindows 10 Pro.、CPUがCore i7-8700K (3.7GHz)、64GBメモリのPCを使用し、数理最適化問題の求解にはGurobi Optimizer 10.0.1¹¹⁾を使用した。

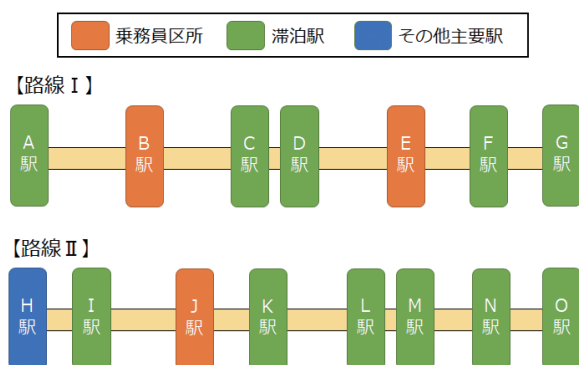


図7 対象路線の路線図

表2 対象路線の問題規模

路線	乗務員	乗務員区所数	列車数	トリップ数
I	車掌	2	483	430
II	運転士	1	402	403

4.2 結果と考察

提案手法を各路線データに適用した結果を表3、表4に示す。表3には、行路作成に関して、路線I、IIのそれぞれの自動作成した結果と実際の運用を記載している。表には勤務日数、1日平均労働時間、平均拘束時間（泊まり行路のみで集計）、計算時間（秒）を示す。勤務日数については、路線I、IIともに実際の運用より少なくなっており、勤務日数が少ない計画を作成できている。一方で、1日平均労働時間については、Iでは実運用よりわずかに低下したものの、IIでは増加している。また、平均拘束時間は、I、IIとも大幅に増加している。労働時間、拘束時間ともに、制約条件を満たしており問題はないものの、実務においては、行路作成時は要員数だけでなく労働時間、拘束時間等の指標に基づく乗務員の労働負荷を重要視している可能性が示唆される。

表4では、交番作成に関して、自動作成と実際の運用を比較している。表には要員数、休日を含む在宅休養時間の必要時間からの差分の最小値、計算時間（秒）を示している。要員数は路線I、IIともに、実際の運用よりいずれも少なくなっている。また、休日を含む在宅休養時間の余裕時間も、実際の運用より多くなっている。以上より、効率性、労働負荷の観点のいずれでも実際の運用より望ましい計画を得ることができたといえる。

また、計算時間については、路線I、IIのいずれも、行路作成、交番作成を合わせて30分以内となっている。現在の手作業ベースでは数日～数週間を要していることを踏まえると、十分に短時間であるといえる。

5. 結論

本稿では、ダイヤ改正時の乗務員運用計画の作成業務に着目し、要員数を最小化することを可能とする自動作成手法を提案した。提案手法は数理最適化を採用し、行

表3 行路作成の結果

路線	方法	勤務日数	1日平均労働時間	平均拘束時間	計算時間(秒)
I	提案手法	72	6:57	23:40	125.7
	実運用	73	7:05	20:48	—
II	提案手法	80	6:48	20:43	237.2
	実運用	82	6:12	19:17	—

表4 交番作成の結果

路線	方法	要員数	余裕時間	計算時間(秒)
I	提案手法	104	7:54	32.4
	実運用	105	2:48	—
II	提案手法	116	9:12	1010.7
	実運用	119	0:32	—

路作成，交番作成を段階的に行う二段階法に基づくものとした。提案手法の有用性を検証するために，運転士，車掌のそれぞれに対して国内の实在路線データに適用したところ，それぞれ30分以内で，実際の運用より要員数が少ない計画を自動作成できることを確認した。一方で，拘束時間や労働時間は実際の計画より長くなり，実務においては，乗務員の労働負荷を考慮した計画を作成している可能性があることが明らかとなった。

今後は，乗務員の労働負荷の観点を実用性を取り入れることで，より実用性の高い乗務員運用計画の自動作成手法の開発に取り組む。

文 献

- 1) 鉄道総合技術研究所運転システム研究室：鉄道のスケジューリング，エヌ・ティー・エス，2005
- 2) 梅谷俊治：しっかり学ぶ数理最適化－モデルからアルゴリズムまで－，講談社，2020
- 3) Heil, J., Hoffmann, K., Buscher, U., "Railway crew scheduling: Models, methods and applications," *European Journal of Operational Research*, Vol.283, pp.405-425, 2020.
- 4) 三浦礼，今泉淳，福村直登，森戸晋：鉄道における乗務員運用計画の集合被覆問題に対する Wedelin の解法の適用，電気学会論文誌 C, Vol.129, No.10, pp.1958-1967, 2009
- 5) 西竜志，室井裕喜，乾口雅弘，高橋理，片岡健司：実乗務制約を有する鉄道乗務員運用計画問題に対する列生成法の適用，電気学会論文誌 C, Vol.131, No.6, pp.1199-1208, 2011
- 6) 坂口隆：制約論理プログラミングの探索手法と対話型スケジューリング，オペレーションズ・リサーチ，Vol.47, No.1, pp.16-21, 2002
- 7) 杉山泰智，西竜志，乾口雅弘，高橋理，上田健詞：労働条件の公平化を目的とした鉄道乗務割交番作成問題に対する分解法，システム制御情報学会論文誌，Vol.25, No.10, pp.272-280, 2012
- 8) 坂口隆，加藤怜，福村直登：要員効率に着目した乗務員運用計画の作成手法，鉄道総研報告，Vol.27, No.2, pp.11-16, 2013
- 9) 加藤怜，中東太一，小久保達也：要員数の最小化を指向した乗務員運用計画の自動作成アルゴリズム，電気学会論文誌 D, Vol.144, No.5, pp.342-352, 2024
- 10) 久保幹雄，田村明久，松井知己（編）：応用数理計画ハンドブック（普及版），朝倉書店，2012
- 11) Gurobi Optimizer: <https://www.gurobi.com/jp/products/gurobi/>(参照日：2024年5月27日)