

災害復旧段階における乗務員運用計画の自動作成手法

加藤 怜* 今泉 淳** 中東 太一***

Automatic Crew Scheduling Algorithm After a Large-scale Natural Disaster

Satoshi KATO Jun IMAIZUMI Taichi NAKAHIGASHI

When sections of railway lines are partially disrupted due to damage from large-scale natural disasters, it is necessary to prepare crew schedule plans for temporary timetables. In such cases, crew schedule plans ensure that the duties once assigned to crews are not altered. As this task is time-consuming for schedule planners, there is a desire for an automatic crew scheduling method. This paper focuses on crew scheduling in the aftermath of a large-scale natural disaster and proposes an automated generation algorithm based on mathematical optimization. In addition, we show the results of computational experiments based on a real disaster case, demonstrating that the proposed algorithm can generate an efficient schedule plan in a short time.

キーワード：乗務員運用計画，災害，暫定ダイヤ，暫定行路，数理最適化

1. はじめに

列車運行のためには、あらかじめ、列車ダイヤのみならず、乗務員の担当スケジュールを示す乗務員運用計画を作成する必要がある。乗務員運用計画は、乗務員の勤務計画に対応するため、就業規則などの規程類に基づく各種制約条件を満たすとともに、限られたリソースの有効活用の観点から、なるべく効率的な計画を作成する必要がある¹⁾。乗務員運用計画は、現在も熟練した担当者による手作業により作成されており、ダイヤ改正時は、1路線あたり数日～数週間程度をかけて作成している（以下、ダイヤ改正時に作成する計画を「基本計画」と呼ぶ）。

近年、広域かつ大規模な自然災害（以下、単に「災害」とすることがある）の発生頻度が高まっている。そのような事象が生じ、鉄道路線上の設備が被災すると、長期間、長区間の運転見合わせが生じることがある。この場合、復旧作業の進捗に応じて段階的に運転区間が広まるが、そのときの輸送計画は区間拡大の都度、複数回にわたり作成し対応しているのが実態である。特に、乗務員運用計画は列車ダイヤや車両運用計画を作成後の作業となるため、運転区間拡大日に間に合うよう短期間で作成する必要があり、担当者の業務負担は極めて大きい。

一方で、乗務員運用計画の作成業務の省力化のため、自動作成技術の研究が進んでいる。しかし、既存の研究の多くは基本計画を対象としたものである。災害は突発的に発生するため、すでに乗務員に対し当該月の勤務は通知済みである。そのため、基本計画の自動作成手法をそのまま適用すると、休日となっていた日が出勤に振り替わる可能性があり、乗務員の負担が大きい。災害時には、このような勤務変更への配慮が必要となる。

そこで本研究では、災害復旧段階における乗務員運用計画の自動作成手法に焦点を当てる。具体的には、基本計画で作成する乗務員の1回の勤務を示す「基本行路」を基に、災害後の列車ダイヤ（以下、「暫定ダイヤ」）に対応した「暫定行路」を自動作成する手法を提案する。そのうえで、国内の実路線データを用い

* 信号技術研究部 運転システム研究室

** 東洋大学

*** 元 信号技術研究部 運転システム研究室

て、過去に実際に発生した災害事例に基づくケーススタディにより、提案手法の性能を検証する。

2. 乗務員運用計画と災害復旧段階における要件

2.1 乗務員運用計画

乗務員運用計画の作成は、行路作成と交番作成の、大きく2段階に分けられる。各乗務員は、営業路線上のいくつかの駅に隣接して配置されている「乗務員区所」に所属し、所属する乗務員区所の最寄り駅から勤務を開始し、いくつかの列車乗務を担当した後、所属する乗務員区所に戻り、勤務を終える。この1回の勤務のことを「行路」と呼ぶ。行路には、1暦日中に終了するもの（以下、「日勤行路」）と、2暦日にまたがるもの（以下、「泊まり行路」）がある。一般的に、朝ラッシュ時間帯が1日のなかで最も列車本数が多いため、泊まり行路の方が日勤行路よりも多い。

行路には、労働時間、乗務時間などに対して就業規則や乗務割交番作成規程などの規程類に基づく多数の制約条件が定められており、作成の際にはこれらをすべて満たすことが求められる。このような多様な条件を考慮したうえで、各乗務員区所に対しいくつかの行路を作成し、列車ダイヤ上の全列車や全作業に1人以上の乗務員が充当されるようにする必要がある。

行路を作成したのち、乗務員区所ごとに行路の担当順序を定めるとともに、必要に応じて休日を追加し、数日から数週間にわたる勤務の内容を示す計画を作成する。この計画のことを「交番」と呼ぶ。交番においても、連続する2つの行路間には、前の行路と後の行路の間に前者の内容に応じた適切な休憩時間（以下、「在宅休養時間」）を確保する必要があるなど、様々な条件を考慮する必要がある。なお、実際の各乗務員の勤務は、交番に基づき月単位で作成され、「勤務表」として各月末に翌月分が通知される。

図1には列車ダイヤおよび車両運用計画の例を、図2には対応する行路の例を示す。図1の丸印は車両の出区、三角印は入区を意味する。A駅およびB駅が乗務員区所の最寄り駅であり、それぞれA区所、B区所とすると、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おり、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。一般的に、便乗は少ない方が望ましい。

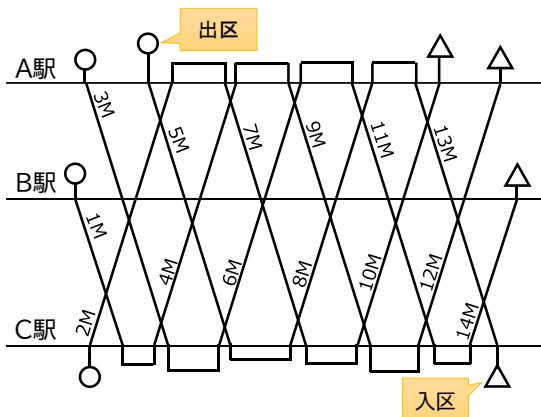


図1 列車ダイヤおよび車両運用計画の例

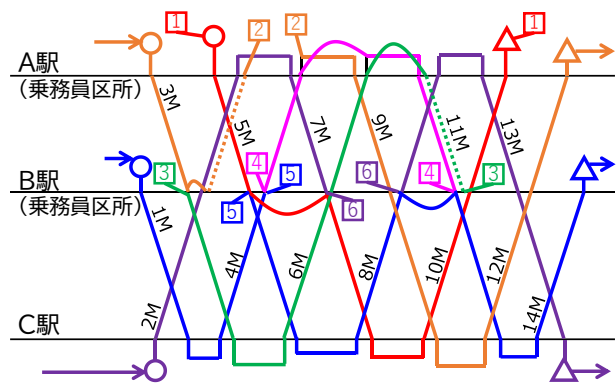


図2 対応する行路の例

2.2 災害復旧段階における乗務員運用計画作成の要件

災害復旧段階の乗務員運用計画作成の要件を抽出するため、過去に大規模災害後の輸送計画作成に関わった実務担当者を対象に、ヒアリング調査を実施した。また、災害発生当時の運用計画の実績を取得し、当時の計画を分析した。その結果、災害復旧段階における乗務員運用計画作成の特徴として複数の要件を

抽出した。以下でそれぞれについて説明する。

2.2.1 運転区間拡大と孤立区間への対応

災害により被災した場合、被災箇所の復旧作業が行われ、作業が完了した後に当該区間の運転が再開される。そのため、被災箇所が複数にわたる場合、作業の進捗に応じて運転区間の拡大が数段階にわたることがあり、輸送計画は区間拡大のたびに作成する必要がある。

図3に、運転区間拡大の例を示す。A駅～E駅の線区で、各駅間が被災した例である。まずA駅～B駅間、D駅～E駅間で運転を再開し、その10日後にC駅～D駅間、最後にB駅～C駅間で運転再開となっている。なお、乗務員区所がA駅隣接の場合、運転再開初日のD駅～E駅間、10日後のC駅～E駅間は運転区間に乗務員区所がないため、A駅から各駅間に乗務員を送り込む必要がある。このような運転区間に乗務員区所がない区間を「孤立区間」と呼ぶ。孤立区間が発生した場合は、新幹線便乗や、タクシー便乗など、基本計画ではほぼない特殊な便乗により、乗務員を送り込む。

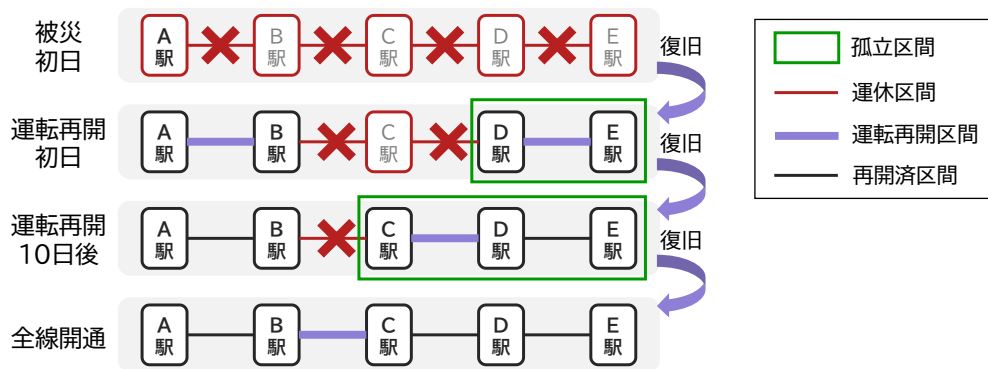


図3 運転区間拡大の例

2.2.2 基本行路に対応させた暫定行路の作成

2.1節で述べたように、乗務員の勤務表は月末に翌月分が通知されるため、災害発生時点で、当月分の勤務は確定している。行路を白紙から作成すると、本来休日の乗務員が勤務に振り替わる可能性があるのみならず、勤務作成担当者にとっても勤務表再作成の負担がかかってしまう。そこで、基本行路に対応づけて暫定行路を作成する。具体的には、基本行路が泊まり行路であれば泊まりか日勤の暫定行路を、基本行路が日勤行路であれば日勤の暫定行路を作成する。この考え方に従うと、交番や勤務表の再作成が不要となり、乗務員の休日が勤務に振り替わることも避けられる。

2.2.3 計画作成の時間と効率性の考慮

乗務員運用計画は、暫定ダイヤと車両運用計画が定まった後に作成するため、施行日までの時間が限られていることが多く、非常に短い時間での作成が求められる。一方、次の運転区間拡大まで数日～数十日程度は同一の計画を実施することも多く、一定の効率性および乗務員の労働負荷を考慮した行路の作成も求められる。

2.3 評価指標と制約条件

2.2節で述べた要件に基づき、本研究では、基本行路に対応した暫定行路を作成することで、乗務員運用を自動作成する。作成する乗務員運用の評価指標と制約条件は、以下のように定義する。

まず、評価指標については、2.2.3項で述べたように、ダイヤ改正時と同様に、効率的な計画を作成する必要がある。そこで、評価指標は効率性の指標となる「勤務日数」（日勤行路を1、泊まり行路を2とした合計）とし、なるべく少なくすることを考える。また、「便乗数」も併せて少なくする。

続いて、本研究で考慮する制約条件を以下に示す。まず、ダイヤ改正時と同様の、規程類に基づく各種条件を示す。

- (1) 暫定ダイヤ上の全列車全区間、全作業に対し、1つ以上の暫定行路を割り当てる。
- (2) 各暫定行路は、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。
- (3) 各暫定行路は、拘束時間の「上限」を満たす。上限は、日勤と泊まりで異なる。
- (4) 各暫定行路は、労働時間の「上限」を満たす。
- (5) 各暫定行路は、休憩時間の「下限」を満たす。
- (6) 各暫定行路では、必要な食事時間（朝・昼・夕）を確保しなければならない。本項目は「ある時間帯において、休憩時間を所定の時間以上確保」という形式で規定される。
- (7) 各乗務員区所では、乗務可能な範囲や、列車種別が存在する。
- (8) 泊まり行路では、睡眠時間の「下限」を満たす。
- (9) 1 継続乗務時間の「上限」を満たす。
- (10) ある継続乗務と次の継続乗務の間合い時間は「下限」を満たす。

さらに、2.2.2 項で述べた暫定行路の考え方にに基づき、以下の制約条件を考慮する。

- (11) 基本行路が日勤行路の場合、対応する暫定行路は日勤行路とし、出退勤箇所は同一とする。
- (12) 基本行路が泊まり行路の場合、対応する暫定行路は泊まり行路とし、出退勤箇所は同一とする（在宅休養時間の考慮が煩雑となるため、日勤行路は不可とする）。
- (13) 各暫定行路の出勤時刻は、対応する基本行路の出勤時刻以降とする。
- (14) 各暫定行路の退勤時刻は、対応する基本行路の退勤時刻の一定時分後までとする。

条件 (13) の出勤時刻の制約は、基本行路より早くすると、出勤遅延のリスクが生じるため設けている。また、条件 (14) のように退勤時刻にも制限を加えているが、これは条件 (13) を含めて、交番に展開したときに基本計画の交番のままで実施する際に、在宅休養時間を違反することを避けるためである。

3. 自動作成手法

3.1 既往研究

乗務員運用計画の自動作成に関する研究としては、主にダイヤ改正時を対象とした研究が多数存在する。欧米を中心に多くの取り組みがあり、それらは Heil et al.²⁾ に対象や手法ごとにまとめられている。しかし、乗務員運用の最も重要な制約条件である労働条件は、各国の法律により規定されている部分もあり、条件の細部は異なることが多いことに留意する必要がある。一方、国内でもいくつかの取り組み事例があり、たとえば今泉ら³⁾、西ら⁴⁾、加藤ら⁵⁾などが挙げられる。国外、国内にかかわらず、これらの乗務員運用の自動作成に関する研究の多くで、数理最適化が適用されている。

一方、本研究が想定する災害時の輸送計画の自動作成に関する研究は数が限られる。暫定ダイヤを対象とした研究として國松⁶⁾、車両運用計画を対象とした研究として加藤ら⁷⁾の研究が挙げられるが、筆者らの把握する限り、乗務員運用計画を対象とした研究は国内外ともに見受けられない。

3.2 列生成法の適用

自動作成手法の構築にあたっては、乗務員運用計画が複数の行路から構成されるので、「行路のよい組み合わせを見つける」というアプローチが自然である。また、行路のよい組み合わせを見つけるにあたり、数理最適化で有名な「集合被覆問題」⁸⁾ やその派生形としてモデル化すると、後述するように「問題の列に行

路を対応させる」という自然な関係付けが可能である。そこではまだ手元にはない行路をどう作るかという課題が生じるが、「列生成法」⁹⁾がその解決に役立つ。すなわち、問題を解く過程において、手元にはまだない列を一定の理論的枠組みで生成できる。

列生成法は一般に乗務員運用計画に対する有力な方法だが、それそのものは最終的な乗務員運用計画を得る方法ではなくその途中段階までの方法であるため、最終的な乗務員運用計画を得るためには、別の対応も必要である。加えて本研究が対象にする災害時の場合は、

- ・平常時よりも短時間で相応の乗務員運用計画を作成したい
- ・災害時の状況に固有な条件を加味する必要があるといった要因も無視し得ない

などの事情がある。そこで本研究では、西ら⁴⁾あるいは加藤ら⁵⁾の方法に依拠し、計算時間の短縮の対策と本研究の問題に対応した修正を施した解法を提案する¹⁰⁾。

3.3 トリップの作成

集合被覆問題に対し列生成法を適用するためには、その準備段階として、集合被覆問題における行と列を何に対応させるか決める必要がある。本研究では、列は暫定行路に、行は乗務員の乗務の最小単位に対応させる。ここで、乗務の最小単位は車両運用をもとに作成する「トリップ」とする。トリップは入力となる車両運用の情報を参照し、乗継箇所かつ停車駅かつ乗継に必要な停車時分が確保されている箇所での作業を分割し抽出する。

図4に、運転士を想定したトリップの例を示す。この例では、列車ダイヤおよび車両運用計画は図1と同様だが、B駅のみ乗務員区所であり、B駅で乗務員の交代が可能であるものとする。この場合、各車両運用について、B駅で分割したそれぞれがトリップとなる。トリップが別になる場面で色を別にしており、発駅、経由駅、着駅が同一のトリップは同じ色としている。

以上に基づく、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6個、暫定行

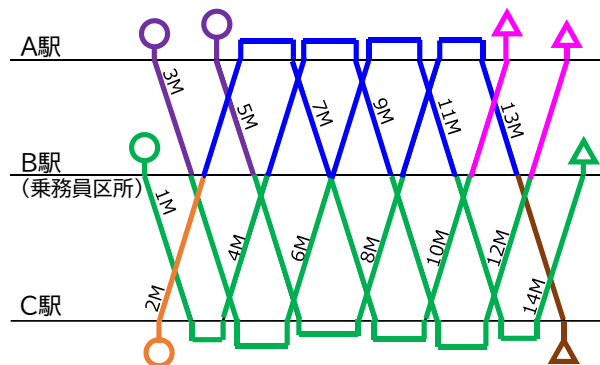


図4 トリップの例

	暫定行路1	暫定行路2	暫定行路3	暫定行路4	暫定行路5	暫定行路6	暫定行路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

図5 集合被覆問題の係数行列の例

路の候補が7個の例である。黄色の部分が、各暫定行路が担当するトリップを示す。たとえば、暫定行路案はトリップ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個の暫定行路のなかから複数個選択し、6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、暫定行路1, 2, 4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4の計画が得られる。

集合被覆問題としてモデル化する際には、あらかじめ制約条件を充足する暫定行路の候補をすべて列挙しておく必要がある。トリップ数にもよるが、一般的に数百万から数千万に達するため、問題規模が大きく実用的な時間で求解は難しい。そこで、先述した列生成法の枠組みを活用し、効果的な暫定行路のみを列挙する。

列生成法に基づくアルゴリズムの手順を以下に示す。

Step 1: 初期列(暫定行路)を準備し限定主問題に追加する。

Step 2: 現在の列を用いて限定主問題を解く。

Step 3: Step 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(暫定行路)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へ戻る。さもなければ、列生成を終了しStep 4へ進む。

Step 4: これまでの生成列をもとに実行可能解を求める。

3.4 限定主問題の定式化

限定主問題とは、一部の列(暫定行路)のみを対象とし、本来は整数である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。

$$\min. \sum_{k \in K} \sum_{j \in J^k} c_j^k x_j^k + \sum_{i \in I} d_i y_i \tag{1}$$

$$\text{s. t.} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J^k} a_{ij}^k x_j^k - y_i = 1, \quad \forall i \in I \tag{2}$$

$$\sum_{j \in J^k} x_j^k \leq 1, \quad \forall k \in K \tag{3}$$

$$x_j^k \geq 0, \quad \forall j \in J^k, \forall k \in K \tag{4}$$

$$y_i \geq 0, \quad \forall i \in I \tag{5}$$

式(1)は目的関数を示す。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)~(5)は制約条件である。式(2)はいずれかの行路による全トリップの被覆を意味する。式(3)は各基本行路に対応する暫

表1 限定主問題で使用する記号

記号	意味
K	基本行路 k の集合
I	トリップ i の集合
J^k	基本行路 k に対応する暫定行路 j の集合
a_{ij}^k	基本行路 k に対応する暫定行路 j がトリップ i を担当する場合1, さもなければ0
c_j^k	基本行路 k に対応する暫定行路 j のコスト
d_i	トリップ i の便乗コスト
x_j^k	基本行路 k に対応する暫定行路 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

定行路を1つまで選択することを意味する。式(4)、(5)は変数の取りうる範囲を意味する。本来、列の選択有無を意味する x_j^d は0-1変数となるが、先述のように整数変数は線形緩和するため、0以上としている。

この定式化は、図5の集合被覆問題に対して、本来の不等号制約(≥ 1 制約)を便乗のカウントのために等式制約とし、各基本行路に対する暫定行路の候補から最大一つを選ぶという制約が付加されていることに留意する。

3.5 列生成子問題

列生成子問題は、現在の限定主問題の解の情報をもとに、目的関数値を改善可能な新たな列を算出する問題である。一般に、現在の限定主問題にない列の「被約費用」と呼ばれる指標が負であれば、現在の目的関数値を改善できる。本問題では各基本行路に対応する形で列(暫定行路)を作成するため、基本行路の数だけ列生成子問題を設定し、各反復ですべての列生成子問題を解く。

基本行路 k に対応する暫定行路 j の被約費用は、下記の式(6)で定義される。

$$c_j^k - \sum_{i \in J^k} a_{ij}^k \pi_i + \theta^k \tag{6}$$

π_i は限定主問題における式(2)、 θ^k は式(3)のそれぞれの双対変数である。先述のように、列は暫定行路を意味するため、生成列は2.3節で示した暫定行路に関する制約条件を満たさなければならない。ここで、被約費用が最小となる列を求める問題は、制約付き最短路問題に帰着する。この問題の解法として、ラベリング法を適用することで、短時間で最適解(最短路)を求めることができる(詳細は文献10を参照)。

3.6 実行可能解の算出

列生成法の過程では、変数 x_j^d は線形緩和しているため、実行可能解(x_j^d が0または1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、文献4、5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 x_j^d 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。

- ・収束段階の限定主問題の最適解において、 x_j^d 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 x_j^d が1つもない場合には、最も1に近い x_j^d 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節のStep2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。

4. 実事例に基づくケーススタディ

4.1 対象路線エリアと検証方法

開発手法の性能を評価するため、過去に発生した大規模自然災害に伴う事例を対象に検証する。対象エリアの路線図の概略を図6に示す。A駅~J駅の本線および、E駅から分岐する2つの枝線、F駅から分岐する枝線から構成される。車掌運用を対象とし、乗務員区所はA駅隣接のA区所およびE駅隣接のE区所の2区所である。各区所の乗務範囲は図中に示している。

対象とする大規模自然災害の例では、本エリアは広範囲で被災し、多数の区間で運転取りやめとなった。運転再開後、多数の段階を経て運転区間が徐々に拡大した。提案手法は各段階での適用を想定しているが、ここでは、そのなかで主要な段階と考えられる以下の3つを検証対象とする。

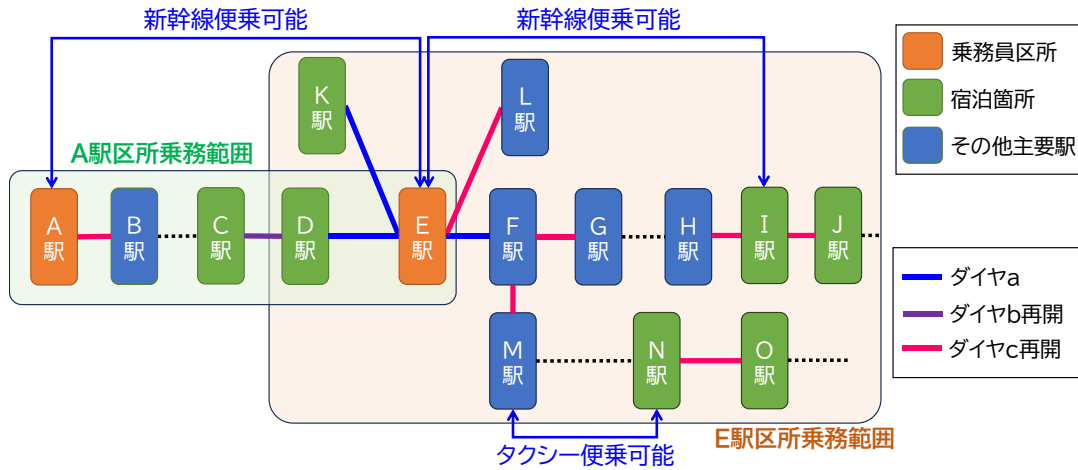


図6 ケーススタディの路線図

表2 ケーススタディ路線の問題規模

列車ダイヤ	列車本数	トリップ数
基本計画	619	—
暫定ダイヤ a	271	388
暫定ダイヤ b	333	408
暫定ダイヤ c	681	728

- ・ 運転再開から数日後の段階で、運転区間は D 駅～F 駅， E 駅～K 駅のみ（暫定ダイヤ a とする）
- ・ 暫定ダイヤ a から数日後の段階で、運転区間の追加は C 駅～D 駅（暫定ダイヤ b とする）
- ・ 暫定ダイヤ b から数十日後の段階で、運転区間の追加は A 駅～B 駅， F 駅～G 駅， H 駅～J 駅， E 駅～L 駅， F 駅～M 駅， N 駅～O 駅（暫定ダイヤ c とする）

なお、暫定ダイヤ a の時点では E 区所のみで乗務していたが、暫定ダイヤ b, c は A 区所, E 区所のいずれも乗務していた。ただし、暫定ダイヤ c の段階でも途中の寸断箇所が多数あったため、孤立区間への乗務員の送り込みおよび戻しが必要であり、特殊な便乗により対応していた。図 6 の青矢印が便乗により移動した区間である。

問題規模の情報として、基本計画および 3 つの暫定ダイヤについて、列車本数、トリップ数を表 2 に示す。また、孤立区間への送り込みおよび戻しについては、当時の実際の運用に合わせて行路の開始・終了場面でのみ可能とした。計算には、OS は Windows 10 Pro, CPU は Core i7-8700K, RAM は 64GB の PC を使用した。また、最適化問題の求解には数理最適化ソルバー Gurobi Optimizer 10.0.1¹¹⁾ を使用した。

4.2 結果と考察

提案手法を各暫定ダイヤに適用した結果を表 3 に示す。表 3 には、作成した計画の勤務日数、便乗数、1 日あたり平均労働時間、労働時間の標準偏差（秒）、計算時間（秒）を示している。また、比較のため、災害が発生した当時の実務担当者が作成した計画の情報を、「a*」など「*」を付した暫定ダイヤの行に示した。

勤務日数をみると、いずれのダイヤでも、自動作成した運用は当時の計画を大きく下回っており、提案手法により効率的な運用を作成できていることがわかる。また、a や b では便乗数も抑えることができている。計算時間についても、a, b では 10 分未満、列車本数の多い c でも 1 時間未満と、十分に短時間といえる。3.6 節で示したように、実行可能解の算出において、整数変数を含まない最適化問題を繰り返し解くア

ルゴリズムを適用しているため、計算の高速化を図ることができたと考えられる。

一方、これら評価指標の数値結果に加えて、生成された暫定行路を実務担当者に評価してもらったところ、労働負荷に関する指摘があった。具体的には、規程には抵触はしないものの、当時の計画に対して暫定行路における労働の比率や密度が高いことが問題視された。そこで、労働時間の平均を計算したところ、表3のようにいずれの暫定ダイヤでも当時の運用より大きかった。このことは、効率性は当初の意図通り高まった反面、各勤務の労働負荷を高めてしまうという結果を招いていたと解釈できる。当時の計画は効率性とともに乗務員の労働負荷に配慮して作成していた可能性もあることから、労働負荷への配慮が必要な可能性が示唆される。加えて、労働時間の標準偏差も比較したが当時の計画に対して若干低い程度であり、これはただちに問題になる値ではなかった。

以上より、可能な限り労働時間の平均を下げる、すなわち乗務員の余裕があるため、それを充てて効率性を犠牲にしても各行路の労働時間を下げ、またそれらができるだけ揃っているような改善が求められた。

表3 各暫定ダイヤの適用結果 (*は当時の計画を示す)

暫定ダイヤ	勤務日数	便乗数	1日あたり平均労働時間	労働時間の標準偏差(秒)	計算時間(秒)
a	59	6	5:42	3000	287
a*	72	14	4:50	4013	-
b	70	20	6:03	2772	413
b*	87	36	4:52	4335	-
c	126	39	5:59	4279	2112
c*	137	40	5:23	6048	-

4.3 制約式の追加

前節の検証結果を踏まえると、勤務日数を最小化することは必ずしも適切ではない。その一方で、勤務日数に対し何も条件がないと、際限なく増加する可能性があり、それは避けるべきである。そこで、式(1)から勤務日数(第1項)を削除し、代わりに制約条件に勤務日数の上限を設ける。そのため、3.4節で示した限定主問題に対して、以下の制約式を追加した。

$$\sum_{k \in K^l} \sum_{j \in J^k} c_j^k x_j^k \leq w^l, \quad \forall l \in L \tag{7}$$

ここで、 L は乗務員区所の集合、 K^l は乗務員区所 l に属する基本行路 k の集合、 w^l は乗務員区所 l の勤務日数の上限である。なお、等式制約ではなく不等式制約としたのは、3.6節で述べた実行可能解算出アルゴリズムの処理の関係上、等式制約とすると実行可能解の算出が難しいと考えたためである。不等式制約であれば、実行可能解が算出されないリスクを大幅に低減できる。

式(7)の制約式を追加した場合、式(6)の被約費用は以下のように修正される。

$$- \sum_{j \in J^k} a_j^k \pi_i + \theta^k + c_j^k \mu^l \tag{8}$$

ここで、 μ^l は式(7)の双対変数である。以上の修正を踏まえて再度の実験を行った。

表4には、暫定ダイヤcについて、勤務日数の上限を設定した場合の適用結果を示す(当時の計画は表3の再掲である)。なお、この結果は勤務日数の上限制約の右辺定数 w^l の合計を133と設定した場合の解である。目的関数で設定した場合と比べ、勤務日数は増加するものの、労働時間の平均や標準偏差は低下することを確認した。よって、この設定で得た計画の方がより実務の要望に近く実用性が高いと考えられる。

ただし、勤務日数の合計上限 133 に対して得た解では 130 となっており、想定より労働負荷が高くなっている可能性もある。すなわち、式(7)の右辺定数値の設定に留意が必要なことも明らかになった。

表 4 勤務日数の上限を設定した場合の適用結果 (*は当時の計画を示す)

暫定ダイヤ	勤務日数	便乗数	1日あたり平均労働時間	労働時間の標準偏差(秒)	計算時間(秒)
c	130	33	5:49	3334	1617
c*	137	40	5:23	6048	—

5. まとめ

本研究では、大規模な自然災害が発生した状況を想定し、運転区間拡大のたびに必要となる乗務員運用計画作成業務に焦点を当て、計画の自動作成アルゴリズムを開発した。災害復旧段階で考慮すべきこととして、通知済みの乗務員の勤務への配慮がある。そこで、各基本行路に対応した暫定行路を作成する考え方を示し、数理最適化の1つである列生成法を適用した手法を提案した。

提案手法の検証のため、実在路線で過去に発生した自然災害事例に基づくケーススタディを実施した。その結果、列車本数 600 本以上の路線データに対しても、勤務日数が当時の計画より少ない効率的な計画を、数十分程度で得られることを確認した。一方で、乗務員の労働負荷について考慮する必要性が明らかとなり、実運用可能な計画を得るための方策として、勤務日数に上限を設ける方法を示した。

今後は、提案手法を実際の業務に展開するために、既存システムとのインターフェースなどを検討することで、早期の実用化を目指す。

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アルゴリズム，エヌ・ティー・エス，2005
- 2) Heil, J., Hoffmann, K., Buscher, U., “Railway crew scheduling: models, methods and applications,” European Journal of Operational Research, Vol.283, pp.405-425, 2020.
- 3) 今泉淳, 植田達広, 森戸晋：鉄道の乗務員運用計画作成問題に対する列生成法の適用，オペレーションズ・リサーチ，Vol.56, No.2, pp.104-109, 2011
- 4) 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
- 5) 加藤怜, 中東太一, 小久保達也：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，鉄道総研報告, Vol.39, No.3, pp.47-53, 2025
- 6) 國松俊徳：車両・乗務員数と運転時分の変動を考慮した暫定ダイヤ自動作成手法，第 29 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.173-176, 2022
- 7) 加藤怜, 今泉淳, 中東太一, 小久保達也：災害発生後の暫定ダイヤに対する車両運用計画作成アルゴリズム，鉄道総研報告, Vol.37, No.10, pp.23-28, 2023
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 加藤怜, 今泉淳, 中東太一：災害発生後における乗務員運用計画の自動作成手法，電気学会論文誌 D, Vol.145, No.5, pp.343-353, 2025
- 11) Gurobi Optimizer, <https://www.gurobi.com/jp/products/gurobi/>（参照日：2025 年 4 月 4 日）