

ダイヤ乱れにロバストな車両運用計画と留置計画の同時作成手法

畠山 遼子^{1,a)} 大槻 知史¹ 久保 英樹²

概要: 鉄道車両の割り当てを定める運用計画の作成は長時間を要するため、多くの鉄道事業者では、運用計画の要素単位である運行を制約を満たすよう環状に並べた運用巡回パターンを作成し、この運行順に車両を運用することで省力化している。これまで様々な運用巡回パターンの作成手法が開発されてきたが、これらは平日・土休日などの単一のダイヤごとに作成するため、ダイヤ切り替えを跨ぐ検査・清掃の周期制約などを考慮できず、また、車両を留置する番線を定める留置計画を考慮しないため、車両を転線させる入換の回数を削減する余地があった。そこで本稿では、平日・土休日などのダイヤ毎の運用巡回パターンと、車両を留置させる番線を定める留置計画を、同時に混合整数計画としてモデル化し求解する手法を提案する。さらに、留置計画の自由度を目的関数として最大化することで、ダイヤ乱れに対するロバスト性を考慮する。本手法を2ダイヤ、15車両、13番線の多摩都市モノレール線に適用することで、ダイヤ跨ぎの前後でも検査・清掃間隔のばらつきが小さい車両運用計画と、ダイヤ乱れ時も入換の少ない留置計画が作成できることを確認する。

キーワード: 鉄道, 運用計画, 留置計画, ロバスト性, 線形計画

Robust model for simultaneous planning of rolling stock rostering and track assignment against traffic disturbances

RYOKO HATAKEYAMA^{1,a)} TOMOSHI OTSUKI¹ HIDEKI KUBO²

Abstract: Rolling stock rostering is a circulation assignment between rolling stocks and train operations subject to several constraints. Although more than one timetable is defined for a train line typically, such that weekday and holiday timetables, previous studies in rolling stock planning are focused on a single timetable. A track assignment determines which storage track to park rolling stocks according to an arrival – departure timetable, or a rolling stock rostering. Despite the dependence, track assignment planning takes a rolling stock rostering as a fixed input. In this paper, we present a robust model against traffic disturbances as linear integer programming for simultaneously planning rolling stock rostering and track assignments for multiple timetables. Setting flexibility of the track assignments as an objective function of the model, one can get robust planning that is rescheduled when traffic disturbance occurs. We apply the model to Tama Intercity Monorail Line and confirm to get stable and robust planning.

Keywords: railway, rolling stock rostering, track assignment, robustness, linear programming

1. はじめに

鉄道ダイヤとは、列車ごとに運転する区間・時刻をスジと呼ばれる線分で繋いで運行計画を示した線図であり、ダイヤ通りに運行するため、鉄道事業者では車両へのスジの

¹ (株) 東芝
Toshiba Corporation, Kawasaki, Kanagawa 212-0001, Japan
² 東芝デジタルソリューションズ (株)
Toshiba Digital Solutions Corporation, Kawasaki, Kanagawa
212-8585, Japan
^{a)} ryoko1.hatakeyama@toshiba.co.jp

割り当てを定めた運用計画を作成する。この際、同一車両によって運転されるスジを繋ぎ合わせた運行を計画要素単位とすることが多い。

運用計画は様々な制約を考慮する必要があり [1], [2], 作成には熟練者でも長時間を要する。

そこで多くの鉄道事業者では運用計画の作成を省力化するため、運行を漏れなく重複なく環状に並べた運用巡回パターンと呼ばれる列を作成している。車両に運行を重複しないよう割り当て、翌日以降はそれぞれ本パターンの順に割り当てていけば、一定期間の運用計画を容易に作成できる。これまで、運用巡回パターンを作成する様々な手法が提案されてきた [3], [4]。

多くの路線では、日による旅客需要の変化に対応するため、平日・土休日ダイヤなど複数のダイヤを組み曜日や祝日に合わせてこれらを切り替える。運用巡回パターンの要素単位である運行はダイヤから定まるため、本パターンもダイヤの種別数だけ作成しダイヤに合わせて切り替え運用計画を作成することとなる。検査・清掃の周期制約などはこの切り替えも考慮することが望ましい。しかし、多くの従来手法は単一の鉄道ダイヤを入力とするため、複数の本パターンを独立に作成することとなり、ダイヤ切り替えを跨いだ制約を考慮できなかった。

近年、車両基地の収容力を上げるため、ほとんどの車両が入庫することとなる夜間留置ではとくに、車両を番線に縦列に留置することが増えている。同一番線に留置される車両の入出庫する順序によっては、他の車両に進路を塞がれその車両を転線させる入換が必要となり、人的・時間的コストが発生する。車両を留置させる番線を定める留置計画はしたがって、入換の回数を抑えるため、入出庫順を考慮して作成するのが望ましい。入出庫順が与えられたとき入換がない留置計画を求める番線割当問題は、様々な拡張やその解法が提案されてきた [5]。ところで、運行における入出庫時刻とは車両が出庫しダイヤに従って運転したのち入庫する時刻であり、留置計画における入出庫時刻とは車両が入庫し夜間留置されたのち出庫する時刻である。留置計画における車両の出庫時刻は、その翌日に割り当てられた運行（以下、翌運行）の出庫時刻であり、運用巡回パターンにより翌運行が与えられることで定まる。したがって、運用巡回パターン作成時に留置計画も合わせて作成することで、運用巡回パターンを所与として作成した留置計画より入換回数が削減できると期待される。

そこで本稿では、ダイヤ種別数の運用巡回パターンと留置計画を同時に混合整数計画としてモデル化し作成する手法を提案する。本手法により、ダイヤ切り替えの前後でも安定した運用計画が作成できる運用巡回パターンと、入換回数を削減した留置計画の作成が可能となる。さらに、留置計画の自由度を目的関数として最大化することで、ダイヤ乱れ時もそのような運用計画を維持できることが期待さ

れる。本手法を2ダイヤ、15車両、13番線（1車両、2車両を縦列に留置可能な番線がそれぞれ11番線、2番線）の多摩都市モノレール線に適用し、その効果を確認する。

2. 問題設定・モデル

多くの路線では平日・土休日ダイヤといった複数の鉄道ダイヤが定められるが、そのダイヤの数をダイヤ種別数と呼ぶこととする。運行とは鉄道ダイヤから定まる車両運用計画の要素単位であり、入出庫場所・時刻や作業実施の可否が与えられる。運行はいくつかのスジを繋いだものであるが着発する駅・時刻など詳細は参照しない。本稿では簡単のため、一日当たり一車両へ割り当てる運行の単位を改めて運行と呼ぶこととし、例えば午前のみ・午後のみ運転する午前・午後運行を一車両に割り当てる場合はそれら二運行をまとめて一運行とする。運行の入出庫順とは、入出庫時刻を昇順で並べた順番である。また、故障など不測の事態に備えて運転せず車両基地に一日留置される車両を予備車と呼ぶが、予備車への割り当ても運行に含めることとし、車両と運行の数を一致させる。

車両は運行に定められた入庫時刻になると定められた入庫場所に入庫し、翌日に翌運行が出庫するまでの夜間、多くの場合はその場所に留置される。これを夜間留置と呼ぶ。運行の入庫場所と翌運行の出庫場所が異なる場合は、夜間留置の前に車両を回送して翌運行の出庫場所まで移動させることとなる。ほとんどの車両は車両基地に夜間留置されるが、少数は駅に留置され、これを特に外留置と呼ぶ。車両基地では、車両を夜間留置するだけでなく、車両の検査や清掃といった作業も特定の時間帯（主に昼間）に実施される。作業実施の可否とは、その特定の時間帯に車両基地に留置されているか否か、すなわち作業を実施可能な運行であるか否かを指す。

運用計画が満たすべき制約は運行の均等な割り当てのほか、

- (i) 入出庫場所の一致、
- (ii) 作業の定期的な実施、
- (iii) 外留置の間隔の確保

がある。(i) を満たせば回送のコストが削減される。(ii) は、車両は定期的な検査や清掃を必要とし、とくに検査は法定周期以内の実施を義務付けられているためである。また、外留置となる車両はしばらく車両基地に戻らず作業が実施できないため、保安上の理由から外留置が連続したり間隔が短くなることが好まれず、(iii) が要請される。以下、制約 (ii), (iii) をまとめて周期制約と呼ぶこととする。

運用巡回パターンとは運行を漏れなく重複なく環状に並べた列であり、この順序で運行を車両に割り当てることで運用計画を作成できる。二運行の運用巡回パターンにおける間隔は、同一車両にそれら運行が割り当てられる間隔

(日数)と等しくなる。したがって、運用巡回パターンが周期制約を満たせば、それから作成される(ダイヤ切り替えを含まない)運用計画も本制約を満たすこととなる。

ダイヤより運行が定まるため、運用巡回パターンはダイヤ種別数だけ作成される。運用巡回パターンをダイヤに合わせて切り替え運用計画を作成するために、異なるダイヤ間での運行の対応を定めた表を作成する。これを運行対応表と呼ぶこととする。運用巡回パターンを切り替える際の翌運行を、一対一対応する運行の翌運行とすることで、ダイヤを跨いでも漏れなく重複なく運行が車両に割り当てられた運用計画が作成できる。

留置計画は車両が留置する番線を定める。本稿では夜間留置における留置計画を対象とする。番線はその設置場所や容量、番線タイプが与えられる。設置場所は車両基地または外留置の駅のいずれかであり、容量とは縦列に留置できる車両数である。また番線タイプは、番線への入出庫の方式を指す。留置位置とは番線とスタックの組を指すとする。スタックとは番線における車両の入出庫口から数えた位置である。

留置計画が満たすべき制約は、

(iv) 入出庫順の整合

であり、番線タイプによって規定される。本制約が満たされない場合、運行や翌運行に定められた入出庫順で入出庫するためには車両を他の番線へと転線させる入換のコストが生じる。

提案手法のモデルは主に、単一ダイヤの運用巡回パターン・留置計画を作成するそれぞれダイヤ種別数のモデルと、異なるダイヤ間の運行対応表を作成するモデルからなる。2.1項では単一ダイヤの運用巡回パターンのTSPによるモデル化について、2.2項では単一ダイヤの留置計画の割当問題によるモデル化について述べる。また2.3項では、運行対応表をマッチング問題としてモデル化し、ダイヤ毎に設計された上記のTSPと割当問題を統合する。さらに2.4項では、ダイヤ乱れにロバストな計画を得るための制約式と目的関数を設定する。

以降は多摩都市モノレール線に合わせて、平日・土休日ダイヤの二ダイヤが組まれており、車両の大部分を一か所の車両基地に夜間留置し、それ以外を二か所の駅1, 2にそれぞれに一車両ずつ外留置する路線を想定する。車両数は P とし、要素数 P の運行の識別子の集合を \mathcal{P} とする。また、留置場所の集合を $\mathcal{B} = \{0: \text{車両基地}, 1: \text{駅1}, 2: \text{駅2}\}$ とする。運行 $p \in \mathcal{P}$ は、入庫場所 b_p^{arv} や出庫場所 b_p^{dep} 、入庫順 t_p^{arv} や出庫順 t_p^{dep} 、作業実施の可否(0-1定数) f_p^{S} が与えられる。 $f_p^{\text{S}} = 1$ となる作業実施可能な運行を以下では作業運行とも呼ぶ。番線数を T として、番線の集合を $\mathcal{T} = \{0, 1, \dots, T-2, T-1\}$ とする。番線 $t \in \mathcal{T}$ は、その設置場所 b_t^{track} や容量 c_t 、番線タイプが与えられる。外

留置の駅1, 2に設置された番線をそれぞれ $T-2, T-1$ とし($b_{T-2}^{\text{track}} = 1, b_{T-1}^{\text{track}} = 2$)、それ以外の番線の設置場所は車両基地とする($b_t^{\text{track}} = 0, \forall T: t \leq T-3$)。また、車両基地の番線タイプはすべてLIFO方式であるとする。以下、平日ダイヤにおける変数や定数を \bullet としたとき、 \bullet' はそれに相当する土休日ダイヤの変数や定数を表す。

2.1 運用巡回パターン

単一のダイヤの運行を制約(i)を満たすよう環状に並べる問題は、運行を「都市」と見做したTSPとしてモデル化できる。TSPは混合整数計画問題として様々なモデル化が知られているが、提案手法ではflow formulation(ff)[6]を用いる。本モデルでは、駅1に入庫する(外留置される)運行をffの基点 $p^0 \in \mathcal{P}$ とする。ffの決定変数は、セールスマンが都市 p から q へ移動するか否かを表す0-1変数 x_{pq} と、 p から q へ移動するときに持つ「モノ」の個数を表す整数変数 u_{pq} である。 x_{pq} はすなわち運行 p の翌運行が q であるか否かを定める。 $\sum_{q \in \mathcal{P} \setminus \{p\}} u_{pq}$ は、運行 p の基点となる運行 p^0 からの経過日数を表すこととなる。

制約(ii)を表現するため、運行 p の作業運行からの経過日数を表す整数変数 d_p を導入する。

$$d_p = 0, \quad \forall p \in \mathcal{P} : q_p = 1. \quad (1)$$

$$d_q \leq d_p + 1 + P(1 - x_{pq}), \quad \forall p \neq q \in \mathcal{P}, \quad (2)$$

$$d_q \geq d_p + 1 - P(1 - x_{pq}), \quad \forall p \neq q \in \mathcal{P} : q_p = 0. \quad (3)$$

作業運行間の間隔の最大・最小値をそれぞれ D^{\max}, D^{\min} とすると、制約(ii)は以下のように表現される。

$$d_p \leq D^{\max} - 1, \quad \forall p \in \mathcal{P}, \quad (4)$$

$$d_p \geq (D^{\min} - 1)x_{pq}, \quad \forall p \neq q \in \mathcal{P} : q_p = 1. \quad (5)$$

外留置の間隔の最小値を D_{soto}^{\max} とすると、その最大値は $P - D_{\text{soto}}^{\max}$ となる。駅1に外留置される運行が基点 p^0 であることから、外留置の間隔は駅2に外留置される運行の基点からの経過日数となり、制約(iii)は以下のように表現される。

$$\sum_{q \in \mathcal{P} \setminus \{p\}} u_{pq} \geq D_{\text{soto}}^{\max}, \quad \forall p \in \mathcal{P} : b_p^{\text{arv}} = 2, \quad (6)$$

$$\sum_{q \in \mathcal{P} \setminus \{p\}} u_{pq} \leq P - D_{\text{soto}}^{\max}, \quad \forall p \in \mathcal{P} : b_p^{\text{arv}} = 1. \quad (7)$$

通常の(ff)の制約式と、以上の制約式(1)-(7)からなるモデルOPを、平日・土休日ダイヤそれぞれの運用巡回パターン作成のため二つ定め、これらをOPsと呼ぶこととする。

2.2 留置計画

留置計画の作成は、運行の番線への割当問題としてモデ

ル化できる。割当問題の決定変数は、運行 p を番線 t に割り当てるか否かを表す 0-1 変数 y_{pt} である。

番線タイプの一つである LIFO 方式は、番線の片側のみから入出庫可能であることを指し、留置される車両の入庫順の逆順と出庫順が一致する“Last in First out”となる。その他の番線タイプとして、片側のみから入庫可能・その反対側のみから出庫可能な FIFO (First in First out) 方式や、両側から入出庫可能な FREE 方式がある。以下では LIFO 方式の番線のみを考える。

車両 i の入出庫順を t_i^{arv} , t_i^{dep} として、同一番線に留置された任意の車両のペア i, j の入出庫順が $t_i^{\text{arv}} < t_j^{\text{arv}} < t_j^{\text{dep}} < t_i^{\text{dep}}$ を満たすとき、入換が必要ない留置計画となる。以下、本制約を LIFO 制約と呼ぶこととする。したがって、入換を許容しない制約は、LIFO 制約を満たさない車両のペア i, j を同一番線に留置しない制約として表現できる；

$$y_{it} + y_{jt} \leq 1, \quad \forall t \in \mathcal{T}, (i, j) : t_i^{\text{arv}} < t_j^{\text{arv}} < t_i^{\text{dep}} < t_j^{\text{dep}}.$$

夜間留置において、入庫順 t_p^{arv} に対する出庫順は、運行 p の翌運行 r ($x_{pr} = 1$) の出庫順 t_r^{dep} に等しい。したがって、運行のペア p, q が LIFO 制約を満たさないか否かは運用巡回パターンより定まる。これを表す 0-1 変数 z_{pq} を導入する。

$$\sum_{s \in \mathcal{P} \setminus \{q\}} t_s^{\text{dep}} x_{qs} - \sum_{r \in \mathcal{P} \setminus \{p\}} t_r^{\text{dep}} x_{pr} \leq P z_{pq}, \quad \forall p \neq q \in \mathcal{P} : t_p^{\text{arv}} < t_q^{\text{arv}}. \quad (8)$$

前述の制約式は、 z_{pq} を用いて以下の通りに表現できる。

$$y_{pt} + y_{qt} \leq 2 - z_{pq}, \quad \forall t \in \mathcal{T} : c_t \geq 2, \quad p < q \in \mathcal{P} : b_p^{\text{arv}} = b_q^{\text{arv}}. \quad (9)$$

本制約が LIFO 方式の番線における制約 (iv) である。

通常の割当問題の制約式と、以上の制約式 (8), (9) からなるモデル SP を、平日・土休日ダイヤそれぞれの留置計画作成のため二つ定め、これらを SPs と呼ぶこととする。

2.3 運行対応表

運行対応表の作成は、マッチング問題としてモデル化できる。平日・土休日ダイヤの運行 p, p' が一対一対応し、その p' の翌運行が q' であるとする。平日ダイヤから土休日ダイヤに切り替える際、 p の翌運行を q' とすれば、切り替え後も運行を漏れなく重複なく割り当てることができる。このように作成した運用計画が制約 (i) を満たすため、すなわち p の入庫場所と q' の出庫場所が一致するよう、対応する p, p' の入庫場所は等しくなければならない。決定変数は、平日・土休日ダイヤの運行 p, p' がマッチングするか否かを表す 0-1 変数 $h_{pp'}$ である。

ダイヤ切り替えを跨いだ制約 (i) を満たすため、対応す

る運行同士の留置位置が一致しなければならない。

$$|y_{pt} - y_{p't}| \leq 1 - h_{pp'}, \quad \forall p, p' \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}, \quad (10)$$

$$\left| \sum_{q \in \mathcal{P} : t_q^{\text{arv}} < t_p^{\text{arv}}} y_{qt} - \sum_{q' \in \mathcal{P} : t_{q'}^{\text{arv}} < t_{p'}^{\text{arv}}} y_{q't} \right| \leq C_t (2 - y_{pt} - h_{pp'}), \quad \forall p, p' \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} : C_t \geq 2. \quad (11)$$

したがって留置計画が対応表を兼ねることとなる。

次にダイヤ切り替えを跨いだ制約 (ii), (iii) を考える。対応する運行の留置位置が等しいことから外留置となる運行同士が対応するため、ダイヤ切り替えを跨いでも外留置が連続することはない。そこで作業運行も連続しないよう、作業運行同士を対応させる；

$$\sum_{p' \in \mathcal{P} : f_{p'}^{\text{S}} = 1} h_{pp'} = 1, \quad \forall p \in \mathcal{P} : f_p^{\text{S}} = 1, \quad (12)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P} : f_p^{\text{S}} = 1} h_{pp'} = 1, \quad \forall p' \in \mathcal{P} : f_{p'}^{\text{S}} = 1. \quad (13)$$

また、外留置となる運行や作業運行の間隔を保つため経過日数が等しい（または近い）運行同士を対応させるとともに、運用計画の作成・変更を容易化するため、異なるダイヤの運用巡回パターンにおいて基点となる運行から数えた順番が等しい運行同士を対応させる制約を課す；

$$\left| \sum_{q \in \mathcal{P} \setminus \{p\}} u_{pq} - \sum_{q' \in \mathcal{P} \setminus \{p'\}} u'_{p'q'} \right| \leq P (1 - h_{pp'}), \quad \forall p, p' \in \mathcal{P}. \quad (14)$$

したがって運用巡回パターンも対応表を兼ねることとなる。

入庫場所が等しい運行を対応させるマッチング問題の制約式と、以上の制約式 (10)-(14) からなるモデル MP を定める。

これらモデル OPs, SPs, MP を合わせた整数計画問題を解くことで、ダイヤ切り替えを跨いで外留置や作業の間隔が保たれた運用計画が容易に作成可能な運用巡回パターンと、入換の必要がない留置計画を同時に作成できる。

2.4 留置計画のロバスト性

遅延や運転見合わせ、運転休止といったダイヤ乱れによって運行の入庫時刻が変動すると、LIFO 制約の違反による入換の必要が生じ得る。そこでダイヤ乱れが生じても入換の回数が増加しにくい運用巡回パターン及び留置計画を考える。以下では簡単のため、多摩都市モノレール線と同様に番線の容量の最大値を 2 とする。また、容量 2 の番線を縦列番線とも呼ぶこととする。

ダイヤ切り替えを考慮した、縦列番線に留置しても入換の必要がないペアを以下では候補ペアと呼ぶ。候補ペア数が縦列番線数より大きい場合、候補ペアの中から縦列番線数の候補ペアを運行の重複なく選び出して適当に縦列番線

に割り当て、残りの運行を容量1の番線に適当に割り当てれば、入換の必要がない留置計画が作成できる。したがって、候補ペア数は留置計画の自由度であると言える。

さらに、候補ペアが多いほどダイヤ乱れにロバストな運用巡回パターン及び留置計画であると言える。ダイヤ乱れによって縦列番線に割り当てられたペアのLIFO制約違反が生じた場合、そのペアに代わって他の候補ペアを縦列番線に割り当てることで、入換の回数が変わらない留置計画を再作成できるためだ。候補ペアが多ければ、複数の運行の入庫時刻に変動が生じるようなダイヤ乱れにも対応でき、ロバスト性が高まると言える。そこで候補ペア数を提案モデルの目的関数とし最大化する。

候補ペア数を数えるため、平日ダイヤの運行 p, q が候補ペアでないか否かを表す0-1変数 v_{pq} を導入する。候補ペアであるとは、LIFO制約を満たし、それぞれに対応する土休日ダイヤの運行のペアもLIFO制約を満たし、さらに同一の縦列番線に留置したときスタックが一致することである；

$$z_{pq} \leq v_{pq}, \quad \forall p < q \in \mathcal{P}. \quad (15)$$

$$z'_{rs} + h_{pr} + h_{qs} + h_{ps} + h_{qr} - 2 \leq v_{pq}, \quad \forall p < q \in \mathcal{P}, r < s \in \mathcal{P}. \quad (16)$$

$$h_{pr} + h_{qs} - 1 \leq v_{pq}, \quad \forall p < q \in \mathcal{P}, r < s \in \mathcal{P} : (t_p^{\text{arv}} - t_q^{\text{arv}})(t_r^{\text{arv}} - t_s^{\text{arv}}) < 0, \quad (17)$$

$$h_{ps} + h_{qr} - 1 \leq v_{pq}, \quad \forall p < q \in \mathcal{P}, r < s \in \mathcal{P} : (t_p^{\text{arv}} - t_q^{\text{arv}})(t_s^{\text{arv}} - t_r^{\text{arv}}) < 0. \quad (18)$$

以上の制約式を前述の提案モデルに追加する。そして、候補ペア数の最大化は候補ペアではない運行のペア数の最小化と等しいため、以下を提案モデルの目的関数として最小化する。

$$\sum_{p < q \in \mathcal{P}} v_{pq}. \quad (19)$$

候補ペアをなす運行が重複している場合、実際に縦列番線に割り当てられるのはその内の一ペアだけである。複数の運行に入庫時刻の変動が生じる状況を想定するならば、運行が重複しない候補ペア数も重要な指標となる。そこで、平日ダイヤの運行 p, q が重複のない候補ペアでないか否かを表す0-1変数 u_{pq} を導入する。運行 p を含む候補ペアのうち、重複のない候補ペアとして数えられるのは高々一ペアである；

$$v_{pq} \leq u_{pq}, \quad \forall p < q \in \mathcal{P}, \quad (20)$$

$$\sum_{q \in \mathcal{P}: q > p} u_{pq} + \sum_{q \in \mathcal{P}: q > p} u_{qp} \geq P - 2, \quad p \in \mathcal{P}. \quad (21)$$

以上の制約式を前述のモデルに追加し、重複のない候補ペア数にマイナスを掛けた以下の式を式(19)と合わせて目

平日ダイヤ						土休日ダイヤ							
運行ID	運行番号	出発時刻	入庫時刻	入庫場所	作業可否	運行ID	運行番号	出発時刻	入庫時刻	入庫場所	作業可否		
0	01	7:21:00	21:39:00	車両基地	作業不可	0	01	4:59:00	23:55:00	車両基地	作業不可		
1	02	5:03:00	23:09:00	車両基地	作業不可	1	02	8:24:00	24:08:00	上北台	作業不可		
2	05	5:16:00	24:15:00	車両基地	作業不可	2	05	6:13:00	24:13:00	車両基地	作業不可		
3	07	6:27:00	24:14:10	多摩センター	作業不可	3	07	5:54:00	22:38:00	車両基地	作業不可		
4	09	5:29:00	23:50:00	車両基地	作業不可	4	09	5:03:00	21:41:00	車両基地	作業不可		
5	11	6:51:00	24:07:35	上北台	作業不可	5	11	5:13:00	24:16:00	車両基地	作業不可		
6	13	4:59:00	22:24:00	車両基地	作業不可	6	13	9:09:00	23:29:00	車両基地	作業不可		
7	15	6:05:00	24:12:00	車両基地	作業不可	7	15	5:09:00	24:14:25	多摩センター	作業不可		
8	17	5:09:00	9:55:00	車両基地	作業可能	8	17	5:26:00	21:52:00	車両基地	作業不可		
9	19	多摩センター	5:24:15	10:29:00	車両基地	作業可能	9	19	多摩センター	5:24:25	9:03:00	車両基地	作業可能
	20	車両基地	15:38:00	20:19:00	車両基地								
10	21	上北台	5:15:00	11:11:00	車両基地	作業可能	10	21	5:15:00	9:48:00	車両基地	作業可能	
11	23	車両基地	5:54:00	11:59:00	車両基地	作業可能	11	23			車両基地	作業可能	
	27	車両基地	16:09:00	21:53:00	車両基地	作業可能					車両基地	作業可能	
12	子1			車両基地	作業可能	12	子2			車両基地	作業可能		
13	子2			車両基地	作業可能	13	子3			車両基地	作業可能		
14	子3			車両基地	作業可能	14	子4			車両基地	作業可能		

図1 多摩都市モノレール線の運行一覧

Fig. 1 Train operations of Tama Intercity Monorail Line

的関数とし最小化する。

$$\sum_{p < q \in \mathcal{P}} u_{pq}. \quad (22)$$

多数の候補ペアが得られた場合、それらから縦列番線に留置する運行のペアを選び出す指標として、入庫時刻の差がある。LIFO制約とは運行のペアの入出庫順の大小関係から定まる制約であり、ダイヤ乱れによるLIFO制約違反とは入庫時刻の変動によって入庫順の大小関係が逆転することで生じる。入庫時刻の差が大きければ多少の変動ではこの逆転が生じないと期待される。したがって、入庫時刻の差が大きい候補ペアから重複なく選び出すことで、ダイヤ乱れに対してさらにロバストな留置計画が作成できる。

3. 評価

提案手法を多摩都市モノレール線に適用してその効果を検証する。

多摩都市モノレール線は、多摩都市モノレールが運営するモノレール路線であり、起点である多摩センター駅から終点である上北台駅までの線路距離16.0 kmを結ぶ。車両基地は高松駅の付近にあり、留置線11線、検修庫1線、検車庫3線、洗浄線2線の番線を備える。運用計画を作成する全15車両のうち13車両は車両基地の留置線に夜間留置され、2車両は上北台駅と多摩センター駅に一車両ずつ外留置される。車両基地の留置線11線のうち、構内作業の利便性から、9線は容量1、2線は容量2の番線(縦列番線)として車両を割り当てる。ダイヤは平日・土休日の二種類が組まれている。図1に各運行の入出庫場所や入庫時刻、作業実施の可否を示す。

本稿ではまず提案手法の結果を紹介し、次に他手法の結果と比較することで提案手法の効果を検証する。

以下の結果はすべて数値最適化ソルバー Gurobi 9.0を用いた。作業運行間の最小間隔は平日・土休日ダイヤともに2とし、作業運行数が両ダイヤで異なることから、最大

平日ダイヤ						土休日ダイヤ					
番目ID	始発駅	出庫	入庫	作業可否	スタック	番目ID	始発駅	出庫	入庫	作業可否	スタック
3	東横線	9	13	×	2	7	東横線	3	13	×	2
9	多摩センター	5	5	○	0	1	9	多摩センター	5	4	○
2	東横線	4	14	×	0	0	5	東横線	4	14	×
1	東横線	1	9	×	3	0	4	東横線	0	10	×
11	東横線	7	4	○	4	11	東横線	11	3	○	4
4	東横線	6	10	×	5	3	東横線	7	8	×	5
13	東横線	13	1	○	6	13	東横線	13	1	○	6
5	東横線	10	11	×	7	1	東横線	9	11	×	7
10	北沢	2	7	○	8	10	北沢	2	5	○	8
6	東横線	0	8	×	9	8	東横線	6	7	×	9
14	東横線	14	0	○	10	14	東横線	14	0	○	10
0	東横線	11	6	×	11	6	東横線	10	9	×	11
12	東横線	12	2	○	12	12	東横線	12	2	○	12
7	東横線	8	12	×	1	0	2	東横線	8	12	×
8	東横線	3	3	○	1	1	4	東横線	1	6	○

図 2 提案モデルを多摩都市モノレール線に適用した結果

Fig. 2 Result of proposed model applied to Tama Intercity Monorail Line

間隔は平日・土休日ダイヤそれぞれ3, 4とした。また、外留置の最小間隔はともに5とした。

3.1 提案手法の結果

図 2 における運行の順序が運用巡回パターンの、「番線」及び「スタック」列の値が留置計画の結果を示す。左が平日ダイヤの、右が土休日ダイヤであり、それぞれ運行はタテに運用巡回パターンの順に並んでいる。また、同一行の平日・土休日ダイヤの運行は番線・スタックが一致することから対応していることが確認でき、したがって図 2 をヨコに見れば対応表となる。制約 (i), (ii), (iii) も満たしている。

同一の縦列番線に割り当てられた運行のペアが候補ペアであることも確認できる。例えば平日ダイヤの運行のペア (9, 2) は、それに対応する土休日ダイヤのペア (9, 5) とともに LIFO 制約を満たし、さらにスタックも一致することから、入換の必要なく縦列に留置できダイヤ切り替えにも対応していることが分かる。

3.2 提案手法との比較

提案手法の、複数ダイヤを運用巡回パターンを留置計画の自由度最大化のもと同時作成することによる効果を検証するため、単一ダイヤの運用巡回パターンと留置計画の同時作成をダイヤ種別数だけ実行する手法と、複数ダイヤの運用巡回パターンを同時作成しその結果を入力として留置計画を作成する二段階の手法、二手法の結果と比較する。

まず、複数ダイヤの計画を同時作成することでダイヤ切り替えを跨いだ周期制約を考慮した効果を確認する。平日・土休日ダイヤ個別に作成する手法と提案手法それぞれの結果から、ダイヤに合わせて運用巡回パターンを切り替えた運用計画を作成し、作業運行の間隔の統計量を求める。結果、比較手法における作業運行の間隔の平均・分散はそれぞれ 2.13, 0.92 となった一方、提案手法では 2.15, 0.30 と分散が大きく改善された。また、比較手法では間隔の最小値が 1 (作業の連続した割り当て)、最大値は検査の法定

周期に等しい 6 となった。一方、提案手法の最小・最大値はそれぞれ 2, 4 と運用巡回パターンにおける間隔の最小・最大値と一致に周期制約を充足した。

次に、留置計画を本計画の自由度最大化のもと運用巡回パターンと同時に作成することでダイヤ乱れに対するロバスト性を考慮した効果を確認する。運用巡回パターンを作成したのち留置計画を作成する手法と提案手法それぞれの、必要な入換回数や、重複のない候補ペア数と (重複を許す) 候補ペアの全運行のペアに対する割合を求める。結果、必要な入換回数は、比較手法では縦列番線数に等しい (取りうる最大値である) 2 回である一方、提案手法では 0 回となった。また、比較手法の重複のない候補ペア数と (重複を許す) 候補ペアの全運行のペアに対する割合はどちらも当然ながら 0 である一方、提案手法ではそれぞれ 6, 0.38 と増加した。

4. まとめ

複数ダイヤの運行を入力としてダイヤ種別数の運用巡回パターンと留置計画を同時に作成するモデルを提案した。これを多摩都市モノレール線に適用した結果、ダイヤ切り替えを跨いでも検査・清掃等の作業を定期的実施可能で外留置が連続しない安定的な運用巡回パターンが得られ、また入換回数を削減した低コストでダイヤ乱れ時も入換回数が増加しにくいロバストな運用巡回パターンが得られることを確認できた。

参考文献

- [1] Otsuki, T., Aisu, H. and Tanaka, T.: A search-based approach to the railway rolling stock allocation problem, Lecture Notes in Comput. Sci., Vol. 6509, pp. 131-143 (2010).
- [2] Lai, Y.C., Fan, K.L., and Huang K.L.: Optimizing rolling stock assignment and maintenance plan for passenger railway operations, Computers & Industrial Engineering, Vol. 85, pp. 284-295 (2015).
- [3] Alfieri, A., Groot, R., Kroon, L., Schrijver, A.: Efficient Circulation of Railway Rolling Stock, Transportation Science 40(3):378-391 (2006).
- [4] Giacco, G.L., D' Ariano, A. and Pacciarelli, D.: Rolling Stock Rostering Optimization Under Maintenance Constraints, Journal of Intelligent Transportation Systems, Vol. 18, No. 1, pp. 95-105 (2014).
- [5] Boysen, N., Flidner, M., Jaehn, F., Pesch, E., Shunting yard operations: Theoretical aspects and applications, European Journal of Operational Research Vol. 220, Issue 1 (2012).
- [6] Gavish, B., Graves, S.C.: The traveling salesman problem and related problems, Massachusetts Institute of Technology, Operations Research Center (1978).