

# 編成の分割併合を考慮した車両運用計画の自動作成手法

加藤 怜\*

Automatic Calculation Method for Rolling Stock Assignment Considering Splitting and Combining of Train

Satoshi KATO

Railway operating companies are required to prepare rolling stock assignment for each timetable revision. In some railway lines, splitting and combining of trains are often used to adjust transportation capacity flexibly. However, these operations are labor-intensive and time-consuming, reduction in the number of splitting and combining is desirable. In this paper, we propose a method for automatically creating rolling stock assignment which reduces the number of splitting and combining of trains using a mathematical optimization technology. Computational experimental results targeting real instances of several railway lines show that the proposed method is effective in terms of evaluation criteria.

キーワード：車両運用計画，分割併合，仕業検査，交番作成，混合整数計画法，巡回セールスマン問題

## 1. はじめに

ダイヤ改正時には、列車ダイヤの作成に加えて、付随する車両等のリソースの使用計画も作成する必要がある。その1つである車両運用計画は、ダイヤ上の各列車に充当する車両編成や、各車両編成の運行スケジュールを定めた計画である。車両運用計画により、その列車ダイヤを実現するために必要となる車両編成数が決まるため、作成担当者はなるべく効率がよい計画の作成を求められる<sup>1)</sup>。

効率的に車両を使用するため、旅客需要の多い朝の通勤時間帯は各列車の両数を多くする一方で、需要の少ない昼間時間帯は少ない両数で運行するなど、柔軟な輸送力設定が可能であることが望ましい。そのため、多くの路線において、各列車の両数を柔軟に変更するために、編成の分割併合を含んだ車両運用計画が作成されている。一方で、分割併合作業には一定の時間および作業員が必要となるため、なるべく少ない方が望ましい。

現在も、車両運用計画の作成は担当者の経験やノウハウに基づき作成されている。しかし、作成に要する時間が膨大であることや、技術継承の課題、担当者の能力に依存した品質となるなどの課題がある。そのため、コンピュータによる自動作成技術の実用化が望まれている。

本稿では、分割併合を含む路線を対象とし、運行効率性の尺度である交番日数や回送距離を低減するとともに、分割併合をなるべく抑制するための車両運用計画の自動作成手法を提案する。その上で、実際の列車ダイヤデータを対象とした提案手法の有効性の検証結果について述べる。

## 2. 車両運用計画の作成

### 2.1 車両運用計画の概要

列車ダイヤを所与とし、ダイヤ上の全列車に必要な車両を充当し、各車両の使用スケジュールを定めたものが車両運用計画である。実際には、1営業日単位のスケジュールである「仕業」と、仕業の順序を定めた循環計画である「交番」を作成する。仕業作成においては、ある充当列車から次の充当列車への接続（つなぎと呼ぶ）の際には、必要な間合い時間を設ける必要がある。交番作成においては、ある仕業の終了駅と次の仕業の開始駅が一致している必要がある（交番の最後の仕業は、その終了駅を最初の仕業の開始駅に一致させる）。

本稿では、それ以上切り離すことが出来ない、複数車両のまとまりを「ユニット」と呼ぶ。通常、交番は車両形式ごとに、また同じ車両形式でも両数が異なれば、それぞれで作成される。本稿では、両数が異なれば、たとえ形式が同一でも別の形式として扱う。

車両運用計画作成における重要な制約条件として、一定周期ごとに車両検査を実施する必要がある。本研究では車両検査の中で最も周期の短い仕業検査を考慮する。

交番における仕業数は対応する形式のユニットの最低必要数を意味するため、リソースの効率的な使用の観点で仕業数はなるべく少ない方が望ましい。また、車両基地に戻す等の理由により、旅客の輸送をせずに車両を移動させる回送が必要になることがあるが、このような回送も少ない方が望ましい。

日本国内の多くの路線において、分割併合を含む車両運用計画が作成されている。「分割」とは複数のユニットからなる編成の切り離しを意味する。「併合」とは複数のユニットの結合を意味する。分割併合により、旅客

\* 信号技術研究部 運転システム研究室

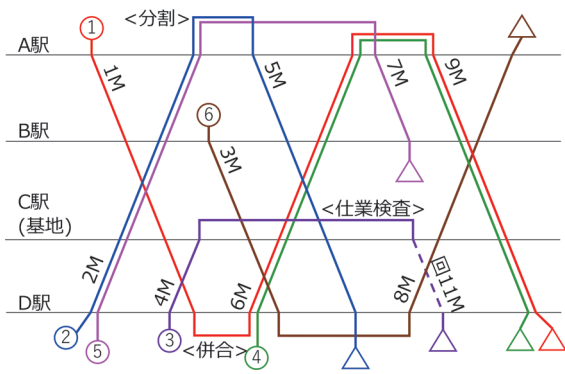


図1 車両運用計画の例

仕業	
1	A ○ 1M D 6M(前) A 9M(後) △ D
2	D ○ 2M(前) A 5M △ D
3	D ○ 4M C <仕業検査> 回11M △ D
4	D ○ 6M(後) A 9M(前) △ D
5	D ○ 2M(後) A 7M △ B
6	B ○ 3M D 8M △ A

図2 交番の例

需要に応じた効率的な列車運行が可能となる一方、分割併合には作業員が必要であり、一定の作業時間が必要であることから、その回数は少ない方が望ましい。

図1には、車両運用計画の例を示している。○は仕業の開始（出区）、△は仕業の終了（入区）を意味する。列車2M、6M、9Mは列車線が二重線となっているが、これは2つのユニットが併合した編成として運行することを意味する。ここで、左側の線が進行方向に向かって前編成、右側の線が後編成を意味する。また、2Mの運行後には分割が、6Mの運行前には併合が行われている。一方、図2には図1の計画の交番を示している。仕業3に仕業検査が含まれているが、仕業1から順に充当されることから、6日に1回仕業検査が実施される。交番における仕業数（「交番日数」と呼ぶ）はその車両運用計画での運行に必要なユニット数を示すため、この例では最低でも6ユニットが必要である。

### 2.2 編成の分割併合と扱いの難しさ

本稿では分割併合を許容するものの、なるべく分割併合回数が少ない計画作成を目指す。そのためには、編成の分割併合が起きているか否かを、判断する手法を構築する必要がある。しかし、分割併合が起きるか否かは、単につなぎ前後の列車のユニット数だけでは判断ができず、各ユニットが編成内のどの位置にあるかにも依存するため、分割併合の有無の判断は非常に難しい。

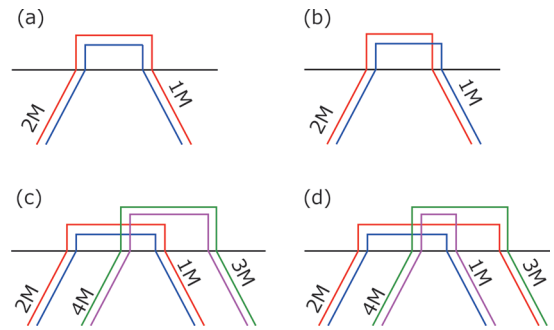


図3 分割併合の複雑さ

図3に例を示す。(a)では、折り返し場面で2つのユニットの前後が入れ替えられているため、分割併合なしに、そのまま折り返すことが可能である。しかし、(b)ではそのままの折り返しでは実現できず、いったん分割し、前後を入れ替えた上での併合が必要となる。(c)の例では、2Mおよび4Mがそのまま折り返しとなっているが、(d)では2Mおよび4Mのそれぞれのユニットを組み替えて1Mおよび3Mに充当しているため、分割併合作業はそれぞれで発生する。このような複雑な分割併合は非効率であるため、実際には許容されにくい。自動作成手法では何らかの制御をしないと、頻発する恐れがある。

### 2.3 既往研究

車両運用計画の自動作成に関する既往研究は欧米をはじめ国外で盛んであり、数理最適化手法の適用例が多い。例えば Alfieri et al.<sup>2)</sup>、Borndörfer et al.<sup>3)</sup>などの研究が挙げられる。国外の研究はネットワークフロー問題としてのモデル化が主流であるが、Giacco et al.<sup>4)</sup>は巡回セールスマン問題（Travelling Salesman Problem：TSP）としてモデル化し、検査制約を満たす手法を提案している。一方で、近年では日本国内の路線を対象とした研究も散見され、今泉ら<sup>5)</sup>、大槻ら<sup>6)</sup>の取り組みがある。

このように車両運用計画の自動作成に関しては多数の研究が行われているが、編成の分割併合に着目した研究は数が限られる。国外では Fioole et al.<sup>7)</sup>、Peeters and Kroon<sup>8)</sup>、国内では Tsunoda et al.<sup>9)</sup>などが挙げられるが、これらは分割併合の作業回数の抑制までは考慮しておらず、結果として、分割併合が多発する非実用的な計画が提案される可能性がある。

### 2.4 問題定義

本稿では、なるべく短時間で計画案作成を目指すため、下記的前提条件を置く。

- ・計画作成対象の列車ダイヤは所与とする。
- ・各列車について、どのユニットをいくつ充当するか、あらかじめ決まっているものとする。また、各列車の

最大ユニット数は2ユニットとする。

- ・回送は自動作成時に設定するが、各列車間のつながりで回送可能な時間が確保されている場合のみ設定可能とする。

以上の前提のもと、対象の全ての形式について、仕業と交番を作成する。評価指標は、総仕業数、総回送距離、分割併合回数の3点とし、どの項目を優先するかはユーザがパラメータで指定できるものとする。

### 3. 本研究のアプローチ

#### 3.1 採用する数理モデル

2.3節で述べたように、既往研究の多くは数理最適化手法を適用している。また、数理最適化の中でも、適用する数理モデルとしては、ネットワークフロー問題、集合分割問題、TSPの大きく3つが挙げられる。

この中で、交番を作成、仕業検査周期制約を充足し、その上で分割併合を考慮という本研究の目的を踏まえた場合、一度の求解で交番を作成でき、仕業検査周期制約を考慮可能なTSPを基本とし、その拡張により分割併合に対応することが、計算負荷抑制の観点からも望ましいと考えられる。よって、本研究では、文献4のTSPに基づく数理最適化モデルを採用する<sup>10)</sup>。

#### 3.2 基本ネットワークモデル

TSPとしてモデル化するために、ネットワークを構築する。まず、各列車に対応するノードを設ける。そして、列車間で車両運用のつながりが可能である場合に、対応するノード間でアークを張る。また、そのつながりが回送を含むか否か、仕業検査を含むか否かにより、4種別のアークを設定する。よって、2つのノード間に複数のアークが張られることになる。各アークのコストは、交番日数、回送距離、分割併合回数（詳細は後述する）を目的関数に反映できるように設定する。このネットワークを対象にTSPとして求解すると、解として得られる巡回路が本手法で作成する交番となる。

図4に、6列車での基本ネットワークと巡回路の例を示す。左図は基本ネットワークであり、6つのノードが設けられている。ノード間には複数のアークが張られているが、上述の4種別の中で設定可能なアークのみ張られている。このネットワークにおいて、右図のような全てのノードを経由する巡回路を求める。

#### 3.3 分割併合を考慮するためのモデルの拡張

前節で示したネットワークモデルは、各列車に対し1つのユニットを充当することが前提である。本稿では2ユニットまで充当することを許容し、また分割併合を想定するため、以下の拡張を行う。

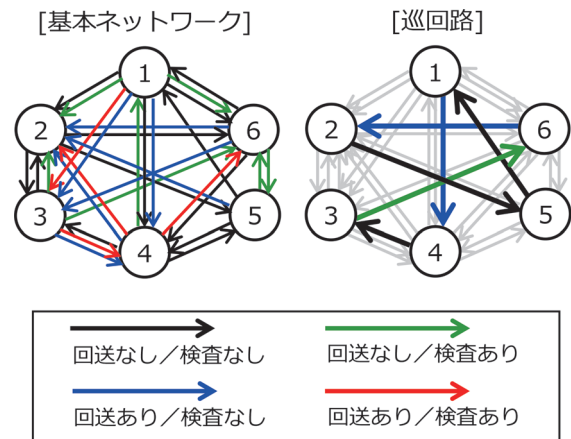


図4 基本ネットワークと巡回路の例

まず、TSPのネットワークについて、2ユニットの列車はその列車に対応するノードを2つ設けることとする。その上で、2つのノードを識別するために、「編成内位置」を定義する。編成内位置とは、2ユニット列車における当該ユニットの地理的な位置を意味するものである。まず、1ユニット列車については、編成内位置は0と定義する。2ユニット列車については、地理的な情報をもとに編成内位置を1もしくは2で定義する。例えば、東側に位置するものを編成内位置1、西側に位置するものを編成内位置2とする。2ユニット列車の終端駅での折り返しの際には、そのまま折り返す場合、地理的な位置は変わらないはずであり、上記で定めた定義により、つながりの前後での編成内位置の変化により、分割併合の有無を判断できるようになる。

編成位置の情報からどのように分割併合回数をカウントするか、以下で分割と併合に分けてその詳細を述べる。

##### 3.3.1 分割回数のカウント方法

どの編成内位置からのつながりであるかにより、下記(A)~(C)の3通りに分かれる。

- (A) 編成内位置0からのつながりの場合
  - 1ユニット列車からのつながりとなるため、つながり先に関係なく、分割は発生しない。
- (B) 編成内位置1からのつながりの場合
  - つながり先の列車の編成内位置により、分割の発生有無が変わる。
  - (B-1) 編成内位置0へのつながりの場合
    - 2ユニット列車から1ユニット列車へのつながりとなるため、分割をカウントする。
  - (B-2) 編成内位置1へのつながりの場合
    - 2ユニット列車から2ユニット列車へのつながりとなり、また編成内位置は同一である。編成内位置2のユニットが同一であれば、分割は生じないが、もし異なる場合には分割が必要となり、カウントする必要がある。よって、編成内位置2のユニットに依存する。

(B-3) 編成内位置 2 へのつなぎの場合

2 ユニット列車から 2 ユニット列車へのつなぎとなるが、編成内位置は異なる。編成内位置が異なる場合には必ず分割が必要となるため、分割をカウントする。

(C) 編成内位置 2 からのつなぎの場合

2 ユニット列車からのつなぎであるため、分割が発生する可能性がある。しかし、もし発生する場合には、編成内位置 1 のユニットで (B-2) もしくは (B-3) でカウントしている。よって、ここでのカウントは不要である。

3.3.2 併合回数のカウント方法

基本的な考え方は分割と同様であり、つなぎの前後が逆になる。どの編成内位置へのつなぎであるかにより、下記 (D)~(F) の 3 通りに分かれる。

(D) 編成内位置 0 へのつなぎの場合

1 ユニット列車へのつなぎとなるため、つなぎ元に関係なく、併合は発生しない。

(E) 編成内位置 1 へのつなぎの場合

つなぎ元の列車の編成内位置により、併合の発生有無が変わる。

(E-1) 編成内位置 0 からのつなぎの場合

1 ユニット列車から 2 ユニット列車へのつなぎとなるため、併合をカウントする。

(E-2) 編成内位置 1 からのつなぎの場合

2 ユニット列車から 2 ユニット列車へのつなぎとなり、また編成内位置は同一である。編成内位置 2 のユニットが同一であれば、併合は生じないが、もし異なる場合には併合が必要となり、カウントする必要がある。よって、編成内位置 2 のユニットに依存する。

(E-3) 編成内位置 2 からのつなぎの場合

2 ユニット列車から 2 ユニット列車へのつなぎとなるが、編成内位置は異なる。編成内位置が異なる場合には必ず併合が必要となるため、併合をカウントする。

(F) 編成内位置 2 へのつなぎの場合

2 ユニット列車へのつなぎであるため、併合が発生する可能性がある。しかし、もし発生する場合には、編成内位置 1 のユニットで (E-2) もしくは (E-3) でカウントしている。よって、ここでのカウントは不要となる。

4. 数理最適化問題としての定式化

3.3 節で述べた分割併合への対応の考え方を、3.2 節で示した基本ネットワークモデルに導入する。具体的には、(B-1)、(B-3)、(E-1)、(E-3) の場合は、必ず分割または併合が発生するため、それに伴うコストを当該のアーキに付与する。また、(B-2) および (E-2) の場合は、分割または併合が発生するか否かは、編成内位置 2 のユニットのつなぎが同様であるか否かに依存する。よって、これらについては論理条件で考慮する。

以上の考え方にに基づき、混合整数計画問題 (Mixed Integer Linear Programming : MILP) として定式化する。使用する記号を表 1 に示す。なお、アーキ種別の 1~4 は、3.2 節で述べた 4 種類のアーキそれぞれに対応する。

制約条件は、割当制約、部分巡回路除去制約、仕業検査周期制約、論理条件に基づく制約、変数制約の 5 種類から構成される。

表 1 定式化で使用する記号の定義

記号	意味
$V$	ノードの集合 (列車の集合, インデックスは $0, 1, \dots,  V  - 1$ とする)
$V_1$	編成内位置 1 のノード集合
$K$	アーキ種別の集合 ( $k = 1, 2, 3, 4$ )
$A$	アーキの集合
$A^k$	種別 $k$ のアーキの集合
$c_{ij}^k$	ノード $i, j$ 間の種別 $k$ のアーキの日跨りコスト
$d_{ij}^k$	ノード $i, j$ 間の種別 $k$ のアーキの回送コスト
$e_{ij}^k$	ノード $i, j$ 間の種別 $k$ のアーキの分割併合コスト
$p_1$	列車位置 1 のノード $i$ と同じ列車の列車位置 2 のノード
$l$	仕業検査周期下限
$u$	仕業検査周期上限
$x_{ij}^k$	ノード $i, j$ 間の種別 $k$ のアーキを選択する場合 1, さもなければ 0
$y_{ij}$	巡回路におけるノード $i, j$ 間の順序
$z_{ij}^k$	ノード $i, j$ 間の種別 $k$ のアーキの前回仕業検査からの経過日数
$r_i$	列車位置 1 のノード $i$ からのつなぎで分割が生じる場合は 1, さもなければ 0
$s_i$	列車位置 1 のノード $i$ へのつなぎで併合が生じる場合は 1, さもなければ 0

〈割当制約〉

$$\sum_{k \in K} \sum_{j: (i,j,k) \in A} x_{ij}^k = 1, \forall i \in V \tag{1}$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i: (i,j,k) \in A} x_{ij}^k = 1, \forall j \in V \tag{2}$$

式 (1) はネットワーク上でノード  $i$  から出力するアーキから 1 つのみ、式 (2) はノード  $j$  に入力するアーキから 1 つのみ巡回路として選択されることを示す。

〈部分巡回路除去制約〉

$$\sum_{j \in V} y_{ij} = \sum_{h \in V} y_{hi} + 1, \forall i \in V \setminus \{0\} \tag{3}$$

$$y_{ij} \leq |V| \sum_{k \in K} x_{ij}^k, \forall i, j \in V \quad (4)$$

$$\sum_{j \in V} y_{0j} = 1 \quad (5)$$

部分巡回路とは、ネットワーク上の一部のノードのみで構成される巡回路を意味する。これは交番上の一部の作業のみで巡回してしまうことを意味し、全作業で巡回するという交番の要件を満たさず、作業検査周期制約を満たす保証ができない。式(3)~(5)の制約式により、この部分巡回路の発生を防ぐことができる。

〈作業検査周期制約〉

$$\sum_{k \in K} \sum_{j: (i,j,k) \in A} z_{ij}^k = \sum_{k \in K} \sum_{h: (h,i,k) \in A^1 \cup A^2} (c_{hi}^k x_{hi}^k + z_{hi}^k) + \sum_{k \in K} \sum_{h: (h,i,k) \in A^2 \cup A^4} c_{hi}^k x_{hi}^k, \forall i \in V \quad (6)$$

$$lx_{ij}^k \leq z_{ij}^k, \forall (i, j, k) \in A^2 \cup A^4 \quad (7)$$

$$ux_{ij}^k \geq z_{ij}^k, \forall (i, j, k) \in A \quad (8)$$

式(6)は直近の作業検査からの経過日数を算出する式である。式(7)は作業検査周期下限、式(8)は作業検査周期上限を意味する。式(6)~(8)により、作業検査周期制約を満たすことができる。

〈論理条件に基づく制約〉

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k - \sum_{k \in K} x_{p_i p_i}^k \leq r_i, \forall i, j \in V_1 \quad (9)$$

3.3節で述べたように、編成内位置1からのつながりの分割は論理条件で把握するが、式(9)はその制約式を示す。分割が生じる場合は、 $r_i = 1$ となり、分割をカウントする。

$$\sum_{k \in K} x_{ji}^k - \sum_{k \in K} x_{p_j p_j}^k \leq s_i, \forall i, j \in V_1 \quad (10)$$

同様に、編成内位置1へのつながりの併合は論理条件で把握するが、式(10)はその制約式を示す。併合が生じる場合は、 $s_i = 1$ となり、併合をカウントする。

〈変数制約〉

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, \forall (i, j, k) \in A \quad (11)$$

$$y_{ij} \in Z^+, \forall i, j \in V \quad (12)$$

$$z_{ij}^k \geq 0, \forall (i, j, k) \in A \quad (13)$$

$$r_i \in \{0, 1\}, \forall i \in V \quad (14)$$

$$s_i \in \{0, 1\}, \forall i \in V \quad (15)$$

式(11)~(15)は各変数の取りうる値、範囲を示す。

$$\alpha \sum_{(i,j,k) \in A} c_{ij}^k x_{ij}^k + \beta \sum_{(i,j,k) \in A} d_{ij}^k x_{ij}^k + \gamma \left\{ \sum_{(i,j,k) \in A} e_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{i \in V_1} (r_i + s_i) \right\} \quad (16)$$

式(16)は目的関数である。第1項は交番日数、第2項は回送距離、第3項は分割併合回数に対するコストを意味する。それぞれに重みパラメータ  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  (いずれも0以上とする) を乗じ、その合計値を最小化する。

## 5. ケーススタディ

### 5.1 対象路線データ

開発した自動作成手法の性能を確認するため、実在する路線データを用いて検証した。検証対象路線は、国内の実在するA~Dの4路線、および仮想的な線区Eの計5路線である。各データの詳細として、列車数(1ユニット列車数、2ユニット列車数の合計)、2ユニット列車数、車両形式数、路線長を表2に示す。

ケーススタディでは、重みパラメータ  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  を変更することで、意図する計画が得られるか確認した。また、路線CやEなどの規模の大きなデータに対し、実行時間内に結果が得られるかについても確認した。

最適化計算の計算時間は、一律で10,800秒を上限とした。計算には、Windows10 Pro, CPU Core i7-8700K, メモリ64GBのPCを使用し、MILPの求解には、数値最適化ソルバーGurobi Optimizer 9.1.1を使用した。

表2 各路線データの問題規模

路線	列車数	2ユニット 列車数	車両形式数	路線長(km)
A	89	32	1	148.6
B	142	19	1	112.8
C	178	80	1	197.5
D	73	33	2	341.6
E	217	39	2	206.1

### 5.2 作成結果と考察

各データに対し、提案手法を適用した結果を示す。重みパラメータについては、下記の3通りを設定した。

- (1)  $\alpha = 1, \beta = 0.001, \gamma = 0$
- (2)  $\alpha = 1, \beta = 0.001, \gamma = 0.001$
- (3)  $\alpha = 1, \beta = 0.001, \gamma = 0.1$

(1) は交番日数および回送距離を考慮し、分割併合回数は考慮しない場合、(2)、(3) は分割併合回数も考慮するが、(3) はより重視した場合を意味する。

表3に、路線A~Cを対象に提案手法を適用した結果を示す。「データ」は路線および重みパラメータの組合せを意味する。同様に、路線D, Eについて、表4に各項目を示す。ただし、2形式であるため、交番日数および回送距離は各形式の値を記している。

表3をみると、路線A~Cのいずれも、重みパラメータ(1)では回送距離は少ないものの、分割併合回数が非常に多い。一方、(2)および(3)では、分割併合回数も大幅に低減できていることがわかる。各路線の(2)と(3)を比較すると、回送距離は(2)の方が、分割併合回数は(3)の方が少ないことがわかる。以上の結果は、重みパラメータがその意図通りに作用していることを示している。なお、交番日数はいずれの路線でも重みに関わらず一定となっている。これは、今回の路線データでは、(1)~(3)において、交番日数に対する重みが、回送距離、分割併合回数に対する重みより十分に大きく設定できていることを意味するとともに、同じ交番日数でも、実行可能な多様な計画案が存在することを示している。以上の傾向は、表4でも共通していることがわかる。

一方、計算時間をみると、(2)や(3)は、(1)に比べ計算時間を要することがわかる。これは、(2)や(3)

では分割併合に対し重みが付与されていることから、定式化上で論理条件に基づく制約式が必要になることが要因と考えられる。この傾向は路線Cで顕著であり、(2)や(3)では既定時間内に計算が終了しなかった。路線Cは列車数が多いだけでなく、2ユニット列車数が多いことから、分割併合が可能な候補箇所が多く、それが求解を困難にしている要因の一つと考えられる。

## 6. まとめ

本稿では、編成の分割併合を含む路線を対象とした、車両運用計画の自動作成手法を提案した。分割併合は輸送力の調整や効率的な運行に寄与する一方で、その作業には労力や時間を要するため、作業回数はなるべく少ない方が望ましい。そこで、数理最適化モデルの1つであるTSPによりモデル化するアプローチを採用した。ここでは、仕業数や回送距離に加え、分割併合回数を減らすことを指向するものとした。実在する路線データを含むケーススタディにて、交番日数、回送距離、分割併合回数のいずれも低減した。以上より、実用的な計画を短時間で作成できることを確認した。

今後は、各列車に対する3ユニット以上の充当、またそのときの分割併合への対応など、実用を踏まえた様々なケースへの対応を検討することで、車両運用計画自動作成手法の実用化につなげたい。

## 謝辞

本研究の実施にあたり、(株)ジェイアール総研情報システムの関係者にご協力頂いた。ここに謝意を表する。

## 文献

- 1) (財) 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) A. Alfieri, R. Groot, L. Kroon, and A. Schrijver, "Efficient circulation of railway rolling stock", *Transportation Science*, Vol.40, No.3, pp.378-391, 2006.
- 3) R. Borndörfer, M. Reuther, T. Schlechte, K. Waas, and S. Weider, "Integrated optimization of rolling stock rotations for intercity railways", *Transportation Science*, Vol.50, No.3, pp.863-877, 2016.
- 4) G. Giacco, A. D'Ariano, and D. Pacciarelli, "Rolling stock rostering optimization under maintenance constraints", *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol.18, No.1, pp.95-105, 2014.
- 5) 今泉淳，山岸雄樹，森戸晋：二段階数理計画アプローチによる鉄道車両運用計画の策定，日本オペレーションズ・リ

表3 計算結果(路線A~C)

データ	交番日数	回送距離(km)	分割併合回数	計算時間(秒)
A- (1)	17	39.5	54	31.6
A- (2)	17	39.5	2	94.8
A- (3)	17	442.1	2	154.8
B- (1)	13	4.8	34	85.6
B- (2)	13	4.8	8	89.0
B- (3)	13	38.8	6	154.5
C- (1)	29	131.6	130	889.1
C- (2)	29	131.6	8	10,800.0
C- (3)	29	192.8	4	10,800.0

表4 計算結果(路線D, E)

データ	交番日数	回送距離(km)	分割併合回数	計算時間(秒)	
D- (1)	17	934.6	114.9	34	10.9
D- (2)	17	934.6	114.9	2	69.7
D- (3)	17	934.6	114.9	2	73.9
E- (1)	14	283.1	37.7	48	587.6
E- (2)	14	283.1	37.7	22	1,084.0
E- (3)	14	391.9	174.5	16	776.0

- サーチ学会和文論文誌, Vol.53, pp.14-29, 2010
- 6) 大槻和史, 愛須英之, 田中俊明: 車両運用計画問題に対する制約充足解法の提案, 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, Vol.53, pp.30-55, 2010
- 7) P.-J. Fioole, L. Kroon, G. Maroti, and A. Schrijver, "A rolling stock circulation model for combining and splitting of passenger trains", *European Journal of Operational Research*, Vol.174, No.2, pp.1281-1297, 2006.
- 8) M. Peeters and L. Kroon, "Circulation of railway rolling stock: a branch-and-price approach", *Computers and Operations Research*, Vol.35, pp.538-556, 2008.
- 9) M. Tsunoda, J. Imaizumi, and S. Morito, "A model for estimating the required number of train units under split-and-merge policy for decision making in railways -a mathematical formulation by integer multi-commodity network flow-", *Proceedings of 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis*, Narashino, Japan, 2015.
- 10) 加藤怜, 森戸晋, 福村直登: 混合整数計画法を用いた編成の分割併合を考慮した車両運用計画の作成, *電気学会論文誌 D*, Vol.142, No.4, pp.280-289, 2022