

車両運用計画自動作成アルゴリズムの開発

福村 直登* 中村 達也** 西森 進矢*** 坂口 隆*

Development of the Algorithm for Train-set Scheduling

Naoto FUKUMURA Tatsuya NAKAMURA Sinya NISHIMORI Takashi SAKAGUCHI

Train set scheduling is one of the most important works in preparing train transportation plan. At present, human experts prepare this schedule, and it takes a lot of time and labor, because train set scheduling is a very difficult work. So, we have developed an algorithm to prepare train set scheduling automatically. We applied probabilistic search method to this algorithm. In this paper, first, we explain about train set scheduling, and then we show how to apply a network model to this problem. Lastly we explain the outline of our algorithm, and show the test result of applying this algorithm to an actual train schedule data.

キーワード：車両運用，システム，自動作成アルゴリズム，巡回セールスマン問題

1. はじめに

鉄道輸送計画は、大きく列車運行計画（列車ダイヤ）、車両運用計画、乗務員運用計画、駅・区所構内作業計画の4つから成り立っている¹⁾。このうち、列車ダイヤは鉄道事業者の商品そのものであるため、利用者の利便性を最優先として、待避・行き違い設備の状況、閉そくなどの線路設備の制約を考慮しながら作成される。従って、列車ダイヤが輸送計画の中核であることに間違いはない。一方、その他3つの計画は列車ダイヤの実行可能性を保証するための計画であり、限られた経営資源である鉄道車両、乗務員（運転士・車掌）、構内番線と作業員を用いる順序を定めた計画である。もちろん、どれが欠けても列車運行はできないので、計画作成担当者間での協議と、その結果にもとづく修正作業を繰り返すことで輸送計画全体の策定が成されている。

しかし、鉄道輸送計画に対してはさまざまな制約条件があるため、多くの担当者が膨大な労力をかけて作成しているのが実情である。さらに、高度な計画作成技術を持っているベテラン社員の大量退職期を迎え、輸送計画作成を支援する仕組みが望まれている。

本報では、鉄道輸送計画の一構成要素である車両運用計画を取り上げ、この計画をコンピュータにより自動作成するアルゴリズムを提案する。また、本研究では、計画作成業務の負荷がとくに大きい、都市圏線区の通勤用電車の運用計画を対象とする。

2. 車両運用計画とは

2.1 列車ダイヤと車両運用計画

列車ダイヤは、前述したとおり、利用者の利便性と線路設備に関わる制約条件を考慮して作成される。

図1に列車ダイヤの模式図を示す。図の縦軸は線区の駅並び、横軸は時刻を示し、各列車の運行計画は斜線で表される。また、斜線横の数字は列車番号を示す。

上記の列車ダイヤに従って、列車を運行するためには、各列車に対して使用する車両（電車等の編成）を割当てる必要があり、この車両割当て計画のことを「車両運用計画」という。端的にいうと、車両運用計画とは、ある列車が終着駅に到着した後、その列車に割当てていた車両の次に割当てる列車を、順次決めることである。

本報においては、前後の割当て列車の間を「つなぎ」、前後の割当て列車を決めることを「つなぐ」、また、各編成の1日分の使用計画を「仕業」、編成群全体の使用計画に対しては「交番」という用語を用いる。また、車両整備に関わる名称としては、JR各社で使われている「仕業検査」（国土交通省令²⁾では「列車の検査」）、「交番検査」（省令では「状態・機能検査」）を用いる。

図1の列車ダイヤに対する車両運用計画の例を図2に示す。図2の各行が仕業である。また、この列車ダイヤ

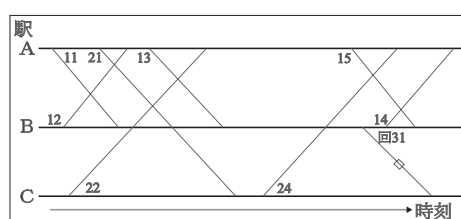


図1 列車ダイヤの模式図

* 輸送情報技術研究部（運転システム）
 ** 西日本旅客鉄道株式会社（鉄道本部運輸部設備課）
 *** 西日本旅客鉄道株式会社（岡山支社せとうち地域鉄道部）

特集：輸送情報技術

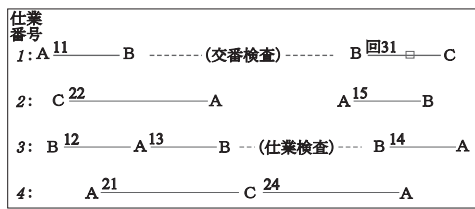


図2 図1の列車ダイヤに対応する車両運用計画
(仕業と交番)

を実行するために車両は4編成必要であり、4編成全体の使用計画が交番となる。各編成は仕業番号順に順次割り当てられ、4日で一巡するように使用される。循環的な使用計画とすることで、各編成の走行距離を均一化することができる。

2.2 車両運用計画の制約条件

車両運用計画作成時に考慮する、主な制約条件を示す。

- (1) 列車ダイヤ上のすべての列車に対して、必ず車両を割り当てなければならない。
- (2) 列車ダイヤで決められている運転時刻は変更できない。変更が必要な場合は、列車ダイヤ担当者と協議する必要がある。
- (3) 保有車両数(編成数)を超える仕業数が必要な運用計画は作成できない。無理な場合は、列車ダイヤを変更するか、車両の増備が必要となる。
- (4) 以下の条件を満たすとき、つなぎを設定できる。
 - ・ つなぎの前列車の着駅と後列車の発駅は、同一駅であること。但し、回送列車を追加して駅を合わせることも可能である。詳細は後述する。
 - ・ 決められている最小折返し時間以上の間合い時間(つなぎの間隔)を確保すること。
- (5) 規定されている周期以内で交番検査、仕業検査を施行すること。通勤用電車では、交番検査の検査周期は90日以内、仕業検査の周期は3～6日以内(形式等により異なる)となっている。
- (6) 検査を施行できる箇所と時間帯は限定されるため、検査に要する時間も考慮して、検査周期内に検査施行箇所に戻る計画としなければならない。本報では、検査施行の時間を「検査間合い」と記す。

他にも制約条件はあるが、直接アルゴリズムには関係しないため省略する。

2.3 車両運用計画の評価指標

ある列車ダイヤに対し、前節で示した制約条件を満たす車両運用計画は、複数作成することが可能であるが、できる限り「良い」計画を作成する必要がある。計画作成時に考慮すべき評価指標を示す。

- (1) 鉄道車両は1編成が数億円以上の高価な資源である

ため、使用編成数は少ないほうがよい。車両運用計画では、1仕業が1編成の使用に対応するので、これは、交番中の仕業数は少ないほうがよい、と言い換えることができる。

- (2) 列車ダイヤの第1案は利用者ニーズを優先して作成するため、各駅での車両需給に過不足が生じている可能性があり、それを解消するために回送列車を設定する(図1中の「回31」)。回送列車は車両運用の都合で設定されるが、回送列車の運行はコストでしかないので、設定本数、及び走行距離は少ないほうが望ましい。
- (3) 車両運用計画では、検査周期を超過しないように検査間合いを設定する必要があるが、1交番内での交番検査・仕業検査の施行回数は少ないほうが望ましい。
- (4) 輸送力調整のために車両の分割・併合を行う線区があるが、作業回数は少ない方が望ましい。
- (5) 各車両には所属基地が決められているが、定期的に所属基地に戻るようにすることが望ましい。

他にも要求事項は存在するが、本研究においては、(1)～(3)の評価指標を中心に考慮することとした。また、基本的な問題を対象とすることとして、本報では(4)の分割・併合を行わない線区を想定する。

2.4 先行研究と本研究の位置付け

車両運用計画に関する国内での研究としては、ダイヤ乱れ時の運用変更計画作成が中心であり、ダイヤ改正時の基本計画作成を対象としている研究はほとんど存在しない。また、国外では多くの先行研究例があるが³⁾、運用計画作成ルールや考え方が異なっているため、国内の通勤用電車に対して、直接適用することは困難である。

このことから、本研究では日本のルールに則った運用計画を自動作成するためのモデル化、及びその解法アルゴリズムを開発することを目的とする。

3. 車両運用計画作成問題のモデル化

3.1 乗務員運用計画作成問題との違い

1章で述べたとおり、列車ダイヤに合わせて作成される計画として、車両運用計画のほかに乗務員運用計画がある。この計画も全ての列車に乗務員が割り当たるように、乗務員の乗務順序を定めるものであり、車両運用計画と共通点が多い。また、乗務員運用計画に対しては多くの研究事例があるが、その全てにおいて、

- ① 全列車に乗務員が割り当たるよう仕業群を確定する。
 - ② ①の仕業群を並べ替えて、交番順序を確定する。
- という2段階で計画作成を行う構成である。

乗務員運用計画の仕業は1回の勤務に対応しており、また、交番順序決定に対する制約条件は、前仕業の退勤時刻から次仕業の出勤時刻までの時間のみであるため、

仕業作成と交番作成を分離することが可能である。

それに対して車両運用計画では、2.2節で示した通り、仕業をまたがる制約条件として検査施行の条件があり、その条件を考慮するためには、乗務員運用のように仕業を決定した後にその並び順を決めるよりも、仕業を重要視せず、交番全体を一体的に決めるほうがアルゴリズム開発の面で有利であると考えられる。

その考え方にもとづき、アルゴリズム開発のベースとなる列車ダイヤとつなぎのモデル化を行った。

3.2 車両運用ネットワーク

車両運用計画を簡単に表現すると、規定された周期毎に検査を施行するよう、列車間のつなぎを定める問題であるということが出来るが、この問題を表現するため、情報工学で広く利用されるネットワーク（またはグラフ）モデルを用いて、モデル化を行った⁴⁾。本報では、このモデルを「車両運用ネットワーク」と呼ぶ。

なお、モデル化する列車ダイヤは、営業列車の運転時刻を定めた、列車ダイヤ第1案であることを仮定する。

(1) 列車の表現

列車ダイヤ上の各列車を、ネットワークモデルのノード（点）に対応させる。1つのノードで1列車を表現する。

(2) 列車間のつなぎ候補の表現

任意の2列車間をつなぐことができるとき、その2列車に対応するノード間に設定するアーク（矢線）によって、つなぎの候補をモデル化する。このとき、

- ・ 前列車の着駅と後列車の発駅が等しく、かつ適切な間合い時間を確保できるとき、両列車に対応するノード間にアークを設定する。
- ・ 前列車の着駅と後列車の発駅が異なる列車間に対しては、両駅間に回送列車を設定できる条件を満たすとき、両列車に対応するノード間にアークを設定する。なお、回送列車設定の条件として、回送列車の所要時間以上の間隔があること、設定可能な時間帯などがある。
- ・ 前列車の着時刻と後列車の発時刻の間で日をまたぐ場合も、両列車に対応するノード間にアークを設定することが可能である。これは交番順序の前仕業の最終列車から次仕業の先頭列車へのつなぎに対応し、このアークには「日またがりフラグ」を付与する（以下、「日またがりアーク」と呼ぶ）。
- ・ 上記の条件を満たさない場合、対応するノード間にアークは設定しない。
- ・ つなぎの候補となる箇所が検査施行可能な駅であり、かつ検査間合い時間を確保できる場合、対応するアークに対して「仕業検査フラグ」、または「交番検査フラグ」を付与する（「検査アーク」と呼ぶ）。また、通常、ネットワークモデルの各アークは大きさ（「コスト」と呼ぶ）を持つが、車両運用ネットワークの

アークのコストを以下のように定義する。

各アークのコスト＝

$$\begin{aligned} & \text{前列車の着時刻から後列車の発時刻までの時間} \\ & + \alpha \times \text{回送列車設定の有無 (有り:1, 無し:0)} \\ & + \beta \times \text{回送列車走行距離} \end{aligned}$$

ここで、 α 、 β は評価指標間の重みに対応する。

なお、ノードAからノードBへのアークと、その逆向きのアークとではコストの値が異なり、またアークが存在しないノード間があるので、車両運用ネットワークは非対称不完全グラフである。

図1の列車ダイヤをモデル化した車両運用ネットワークの例を図3に示す。第1案であるため、回送である回31列車は未設定であることに注意されたい。また、仕業検査はB駅で施行可能としている。

図中、数字付きの円がノードである。数字は列車番号を示す。また、ノード間の矢線がアークであり、矢線の向きでつなぎの前後列車を表す。黒線のアークは同じ駅でのつなぎを、青色のアークは回送列車の設定が必要なつなぎを表す。さらに、アークを付した赤丸は「日またがりフラグ」、黒丸は「検査フラグ」を意味する。

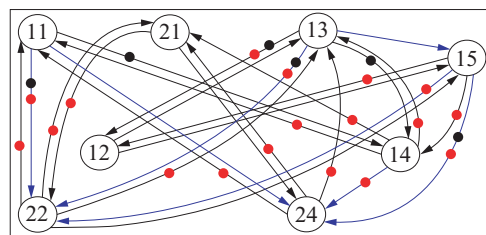


図3 図1の列車ダイヤをモデル化した車両運用ネットワーク

3.3 車両運用ネットワークと車両運用計画

車両運用ネットワークは、列車ダイヤ図上につなぎの候補をすべて書き込んだ状態に対応しているが、この中から、図2の車両運用計画で決めたつなぎのみを残した状態を図4に示す。

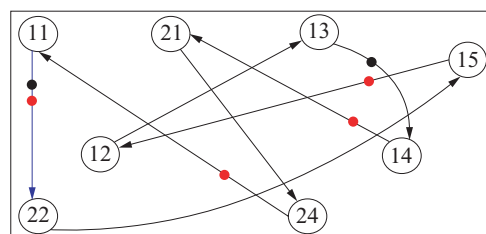


図4 図2の車両運用計画に対応するハミルトン閉路

この図から、車両運用計画に対応するグラフ上の経路（「パス」と呼ぶ）は、すべてのノードを必ず1回ずつ通過し、もとに戻るパスとして現れることがわかる。このようなパスを、グラフ理論では「ハミルトン閉路」と呼ぶ。閉路に含まれる日またがりアークの数（4本）が仕業数となる。また、検査間合いをとる箇所、回送列車の

特集：輸送情報技術

設定が必要な箇所もこの閉路から把握できる。

3.4 巡回セールスマン問題との類似性

前節において、車両運用計画はグラフ上のハミルトン閉路に対応することを示したが、与えられたグラフ上で、アークのコストの総和を最小とする最短ハミルトン閉路を求める問題は巡回セールスマン問題 ("Traveling Salesperson Problem": TSPと略す) と呼ばれ、多くの研究事例が存在する^{5), 6)}。ところで、車両運用ネットワークのアークのコストは、間合い時間と回送列車設定コストであるため、最短ハミルトン閉路は仕業数が最小、かつ回送列車設定も最小となる車両の使用順序に対応すると想定できるが、この使用順序では、検査施行の制約条件を満たしている保証はない。従って、車両運用計画作成問題は検査施行条件を付加したTSP問題と見なすことができる。しかし、非対称グラフに対するTSPは、多項式オーダー計算時間アルゴリズムが発見されていないNP困難に属する問題であり⁵⁾、さらに検査施行条件も加わるため、通勤用線区の車両運用ネットワークに対して厳密解を得ることは困難と考えられる。

そのため、本研究においては、検査施行条件を満たす最短ハミルトン閉路の近似解を求めるアルゴリズムを開発することを目的とした。

4. 車両運用計画自動作成アルゴリズム

4.1 貪欲法をベースとしたアルゴリズム

筆者らのグループは、以前、車両運用ネットワークを用いて、TSPに対する一般的な近似解法である貪欲法によるパス生成手法と、確率的局所探索手法を組み合わせた車両運用計画作成アルゴリズムを開発した⁴⁾。これは貪欲法にもとづいて最短アークを順次パスに追加し、検査周期が近づくたびに、検査アークをパスに組み込むという手順を繰り返して閉路を生成するものである。しかし、この手法では検査アークを適切に組み込むことが難しく、可能解を得られないケースが多数生じたため、異なる手法の開発が必要であることがわかった。

4.2 最短路アルゴリズムと確率的局所探索手法を組み合わせた基本アルゴリズム

前節で示した貪欲法ベースのアルゴリズムの欠点は、アークを順次追加して閉路を作成する方法では、必要な箇所に検査アークを組み込めないことであった。また、検査アークは多数あるため、どのアークを選んで、どの位置に組み込むのが良いかということは、閉路ができないと判断できない。

そこで、パスにアークを追加する過程で組み込める検査アークを探すのではなく、まず検査アークを組み込む

箇所を決めて、それに合わせて閉路を構成する手法を考案した。また、パスの作成方法は貪欲法でなく、グラフ理論の最短路アルゴリズム⁷⁾を応用することとした。

なお、ネットワーク内には検査アークは多数存在し、組み込む箇所の候補も複数あるため、選択するアーク、及び組み込み箇所は乱数を用いて決定する。その選択を他数回繰り返すことで、多数の閉路を作成し、その中の最良の閉路を近似解として採用するという、確率的局所探索手法を採用した⁸⁾。

このアルゴリズムの概要フローを図5に示す。

①の最小所要編成数(H)は、列車ダイヤから列車運行本数が最大となっている時刻を検索し、そのときの列車本数を最小所要編成数とする。また、

$$\text{必要検査回数}(T) = \lceil H/C \rceil$$

で求める。この回数が交番内での必要最低限の検査回数であり、これよりも回数が増えることは望ましくない。

③で検査周期内のパスを求める必要があるが、最短路アルゴリズムを単純に適用すると、検査周期を下回る長さのパスになる可能性が高い。このパス自体は検査周期の条件を満たしているが、①で検査施行回数を必要最低限に抑えているため、これが繰り返されると、実行過程の最後のほうで検査周期を超過するパスしか見つからず、制約条件を満たした閉路が作成できない可能性がある。その対策として、最短路アルゴリズムによって得られた最短パスに含まれる日またがりアークを、別の日またがりアークと交換することで、検査周期に極力近い長さのパスを求めるアルゴリズムを開発した。

⑤で暫定解が得られないケースは、編成数Hでは車両が足りず、運用計画を作成できなかったことに相当するので、そのときは、編成数を増やして再作成する。

図3のネットワークをもとに、図4の閉路が得られる

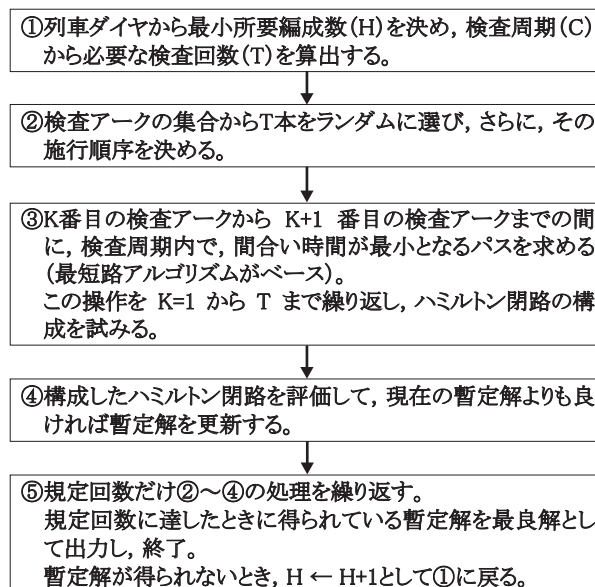


図5 基本アルゴリズムの概要フロー

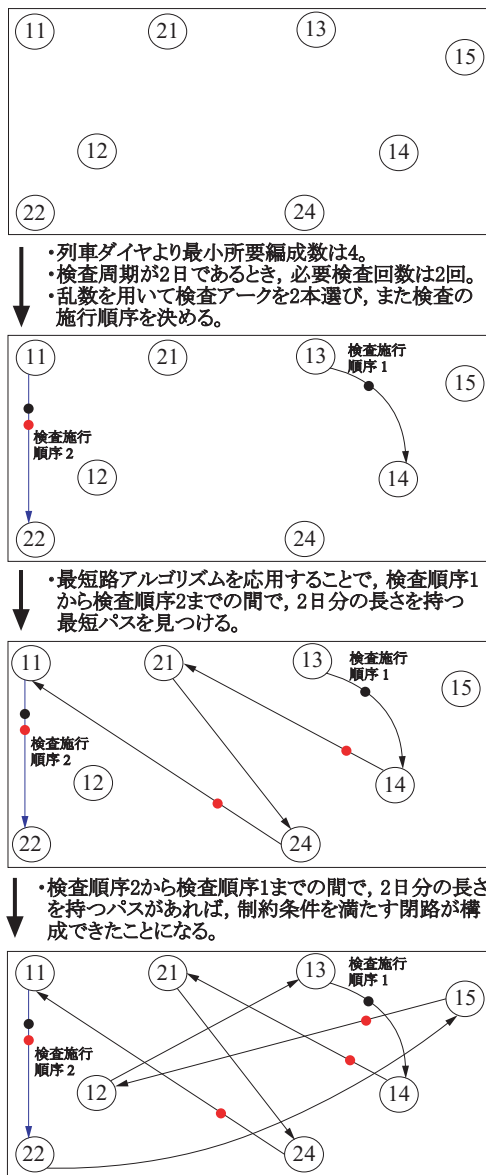


図6 基本アルゴリズムの実行イメージ

までのアルゴリズムの実行イメージを図6に示す。

この基本アルゴリズムの妥当性を評価するため、実際の列車ダイヤから車両運用ネットワークを生成し、そのデータに対して本アルゴリズムを適用したところ、適切な箇所に検査アークが組み込まれているハミルトン閉路が得られ、このことから、検査施行条件を満たした車両運用計画を作成できることを確認した。

なお、検査施行順序1番目のアークについては、交番検査フラグを付加したアークから選択することで、交番検査間合いを持つ仕業が、交番内に必ず1つ含まれる運用計画が作成されるようにしている。

4.3 基本アルゴリズムの改良

基本アルゴリズムで作成した車両運用計画は、すべての制約条件を満たしていることを確認したが、同時に、使用編成数や回送等の評価指標は、実際の運用計画より

も多く、計画の質に問題があることがわかった。また、このアルゴリズムは、ハミルトン閉路の生成を多数回繰り返すというものであるにもかかわらず、計算過程を分析した結果、制約条件を満たす閉路構成に成功する確率は2～3%程度と非常に低いこともわかった。

そこで、作成される計画の質を改善し、また閉路生成の成功確率を上げることを目的とした処理を基本アルゴリズムに追加し、機能向上を図った。

4.3.1 未使用ノードの強制組み込み処理

閉路の構成に失敗する原因は、検査アーク間のパスを最短路アルゴリズムで作成するとき、最短路上にないために、閉路に組み込まれず残ってしまうノードが生じることにある。この残りノードが多数生じる場合は対応が難しいが、5～6ノード以下であれば、パスの一部を修正することで、残りノードをパスに組み込み、閉路を構成することが可能である。この処理を追加することで、閉路構成の成功確率が大幅に改善した。

4.3.2 つなぎ変え処理

担当者が運用計画を作成するとき、異なる仕業の同駅、時間帯のつなぎを切り、その前後を入れ替える操作(「つなぎ変え」)を繰り返して計画内容を改善するが、この操作を応用し、アルゴリズムの機能向上を図った。

ただし、担当者によるつなぎ変えは、切断するつなぎ以外の箇所は固定して入れ替えるが、同じ考え方で閉路中の2本のアークを入れ替えると、検査アーク間のパスの長さが変わり、検査周期の制約を満たさなくなる可能性がある。そのため、つなぎ変えの対象箇所まではパスを固定し、対象箇所以降をすべて作り直すことで検査周期の制約を守っている。また、探索手法を取り入れて、つなぎ変えによって暫定解が更新されたとき、さらに別の箇所のつなぎ変えを試みることにしている。

4.3.3 検査施行順序の変更処理

閉路構成に成功したとき、選択している検査アークは変えずに、施行順序のみを変えて(図5の②)、再度、閉路構成を試みるという処理をアルゴリズムに追加した。この処理に対しても探索手法を採用して、再構成した閉路で暫定解が更新されたとき、さらに順序変更処理を繰り返すこととしている。

前項のつなぎ変え処理とこの処理を追加することで、暫定解の更新回数が増加することを実験で確認した。

4.3.4 検査周期の均等化

例えば編成数が10編成、検査周期(C)が3日であるとき、必要検査回数は4回であるが、1仕業から単純に3日おきに検査間合いを挿入すると、検査があるのは1, 4, 7, 10仕業で、10仕業、1仕業と2日連続で検査を行うことになる。この計画も検査施行条件を満たすが、通常、検査を1, 4, 7, 9仕業に設定するなど検査周期を均等化し、連続して検査を行う計画は避けるのが一般的である。

特集：輸送情報技術

この考え方を、検査アーク間のパスを求める処理(図5の③)に採用し、検査アーク間のパスの長さはC、またはC-1のどちらかとしている。なお、どちらにするかは乱数により決定する。

これによって実務に合った計画となり、また、閉路生成の成功確率も上がることを実験によって確認した。

4.4 実用化に向けた工夫

以上、アルゴリズムの概要を述べたが、実際の列車ダイヤに対して実用的な車両運用計画を作成するためには、アルゴリズムだけでなく、入力データである車両運用ネットワークの作り方も工夫する必要がある。

4.4.1 ノード数の削減

ネットワークモデル中のノード数が多いと、計算時間を要するだけでなく、解の質も低下することがわかっている。また、実際の列車ダイヤでは、運用効率や駅設備の状況を勘案すると、着列車の折返し列車が一意に決まってしまう箇所も多く、その場合、各列車をそれぞれ1ノードとするのではなく、まとめて1ノードとすることで、全体のノード数を減らす必要がある。

4.4.2 各種パラメータの設定

車両運用計画を作成するには、各駅の必要折返し時間、回送列車設定のコストなど、多くのパラメータが必要である。また、例えば、ラッシュ時間帯に回送列車を設定することは極めて困難であるが、閑散時間帯であれば容易など、状況によって変わるパラメータもあり、これらパラメータを適切に設定することが、実用的な運用計画の作成に大きく影響する。

4.5 評価試験

開発したアルゴリズムにより、実態に合った車両運用計画が作成できるかを確かめるために、実在の3線区の列車ダイヤを車両運用ネットワークに変換し、本アルゴリズムによる車両運用計画作成試験を行った。

作成試験の結果を表1に示す。

A、B線区は各駅停車のみの高頻度運行線区であるため、折返し列車が一意に決まる箇所が多く、列車数に比べてノード数は少なくなった。一方、C線区は長距離走行の快速列車主体の線区であり、折返し列車の候補が複数あることが多く、ノード数は比較的多くなった。

表1に示した通り、3線区とも実際の運用計画と同数の編成数の計画が作成できた。また、回送距離に関してはA線区では実運用計画よりも減ったものの、B、C線区では上回る結果となったが、パラメータの設定値によって結果が大きく変わることも確認しており、適正なパラメータ値を設定できれば、より良い結果が得られると考えている。なお、計算時間は設定する繰り返し回数にも依存するが、一般的なPCで数十分～数時間であった。

表1 実際の運用計画と自動作成した計画との比較

線区	A線区		B線区		C線区	
列車数	254		460		138	
ノード	59		102		53	
	実運用	自動作成	実運用	自動作成	実運用	自動作成
編成数	35	35	26	26	25	25
回送数	7	9	3	12	30	34
回送 km	255.3	252.5	10.5	61.7	552.4	704.3

5. 今後の課題とまとめ

本報では、分割・併合を行わず、また全列車を1カ所の車両基地で担当する線区を対象とした、車両運用計画自動作成アルゴリズムの概要と評価試験結果を示した。

複数の車両基地がある線区、分割・併合により輸送力を調整する線区など、より複雑な運用形態をとる線区も多いが、本報で示したものは最も基本的、かつ重要なケースであり、複雑なケースの計画作成の基盤に成り得ると考えている。事実、比較的少数の列車を対象とした試験であるが、このアルゴリズムを拡張することで、上記のような複雑なケースの計画も作成できることを確認している。今後、さらに研究を深度化するとともに、試験を重ねることで、実用化に結びつけたい。

謝辞

本研究開発に対して、貴重な意見をいただいた西日本旅客鉄道(株)の高地明利氏に深く感謝いたします。

文献

- 1) (財)鉄道総合技術研究所運転システム研究室編: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) 鉄道に関する技術上の基準を定める省令:国土交通省令第110号, 2006
- 3) J.F.Cordeau, P.Toth, D.Vigo : A Survey of Optimization Models for Train Routing and Scheduling, Transportation Science, Vol.32, No.4, pp.380-404, 1998.
- 4) 趙鵬, 富井規雄, 福村直登, 坂口隆: 確率的局所探索に基づく鉄道車両運用計画アルゴリズム, 電気学会交通・電気鉄道研究会, 2001
- 5) Lawler et al. : Traveling Salesman Problem, John Wiley & Sons, 1985.
- 6) 山本芳嗣, 久保幹雄: 巡回セールスマン問題への招待, 朝倉書店, 1997
- 7) 伊理正夫, 白川功, 梶谷洋司, 篠田庄司他: 演習グラフ理論, コロナ社, 1983
- 8) 福村直登, 坂口隆, 富井規雄, 中村達也, 西森進矢, 登坂安彦: 鉄道における車両運用計画作成問題, 2003年度日本OR学会春季研究発表会, 2004