

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

加藤 怜* 今泉 淳** 中東 太一* 小久保 達也*

Rolling Stock Scheduling Algorithm for Temporary Timetable After Natural Disaster

Satoshi KATO Jun IMAIZUMI Taichi NAKAHIGASHI Tatsuya KOKUBO

In this paper, we focus on rolling stock scheduling after a large-scale natural disaster. In general, a temporary timetable is generated when some sections in of the line are partially disrupted from the damage caused by the disaster. The next step is to create a rolling stock schedule that is as close as possible to the basic schedule at the time of the timetable revision. We propose a two-phase rolling stock scheduling method based on the mathematical programming algorithm to cope with the temporarily changed timetable. In addition, we confirm that the proposed algorithm can produce a practical solution in terms of evaluation criteria and computational time.

キーワード：車両運用計画，暫定ダイヤ，災害，仕業作成，交番作成，数理最適化

1. はじめに

列車運行のためには、列車ダイヤのみならず、付随する複数の計画を作成する必要がある。その一つである車両運用計画は、毎日の列車ダイヤを実現するための車両の使用予定を定めるものである。その作成にあたっては、保有する車両の種類、数、種々の使用条件を満たすとともに、運用計画そのものの効率性が求められる¹⁾。

一方、災害等で線区の一部が寸断され不通区間が生じた際に、運行可能区間のみで暫定的なダイヤにより運行する場合、一時的なダイヤとそれに対応した車両運用計画の作成を求められる。このような場合には、復旧状況に応じて徐々に運転可能区間が拡大するごとに計画作成が必要となるが、作成にかけられる時間が限られているため、計画担当者の負担は大きい。また、運転区間が拡大するごとに大幅な計画変更は避けた方が望ましい、最終的に全区間で運転再開になったときは元のダイヤに戻るため、各段階での暫定的な計画は元の計画に類似することが望ましい、といった事情もある。

本稿では、大規模な自然災害発生後の車両運用計画の作成に着目し、数理最適化を活用し短時間で自動作成可能なアルゴリズムを提案する。そのうえで、実路線、実事例に基づくケーススタディにより、開発手法の有用性を検証した結果を報告する。

2. 車両運用計画と災害発生後の対応

2.1 車両運用計画の作成

一般に、車両運用計画は、列車ダイヤを所与として、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である。具体的には、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」からなる。仕業作成では、列車間のつながり（ある充当列車から次の充当列車への接続を意味する）に必要な間合い時間を設ける必要がある。交番作成では、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り、場合によってはそのために適宜回送を挿入する。また、交番の最後の仕業の終了駅は最初の仕業の開始駅に一致させて循環性を保証する。

車両運用計画における重要な条件として、車両の検査周期を満たすことがある。本稿では、周期が数日程度で機能確認のための「仕業検査」、数十日程度で詳細確認のための「交番検査」を考慮し、それぞれの検査を、周期以内に可能な箇所で行えるように、検査箇所およびタイミングを決める。

通常、交番はそれ以上切り離しをしない最低の運用単位の車両の種類ごとに作成する。この種類は一般に複数の車両からなり、本稿では「ユニット」と称する。同一形式でも両数や機器の構成仕様が異なれば運用上は別扱いとなる。ここで形式・両数で定まる車両種の識別概念として「ユニットタイプ」を定義すれば、「交番はユニットタイプごとに作成される」と表現できる。

また、ユニットの分割併合を実施している路線もある。各列車が運行される際に充当される1ユニット以上の

* 信号技術研究部 運転システム研究室

** 東洋大学

車両のことを列車運行上は「編成」と呼ぶが、「分割」とは2ユニット以上からなる編成を切り離すことを、「併合」とは別々のユニット（場合によっては編成）を結合することを意味する。分割併合により旅客需要に応じた柔軟な両数設定が可能となるとともに、必要な時間・場所に車両を割り当てる効率的な運用が可能になる。一方で、分割併合を実施するための作業員や作業のための停車時分を要することになるため、分割併合の作業回数は最小限であることが望ましい。

図1、図2に車両運用計画の例を示す。図1はダイヤ図上で作業を示したものであり、○は作業の開始（出区）、△は作業の終了（入区）を意味する。二重線となっている列車が複数あるが、併合した編成が充当されていることを意味する。102M、105M、回57Mの運行後には分割が、105M、102M、56Mの運行前には併合が行われている。一方、図2は交番を示している。列車番号の(F)はその列車の先方側のユニット、(B)は後方側のユニットを意味する。作業3、5、7に作業検査が含まれるが、上の作業から順に車両が充当されることから、ユニットタイプ1は3日に1回、ユニットタイプ2、3は2日に1回検査が実施される。交番における作業数は

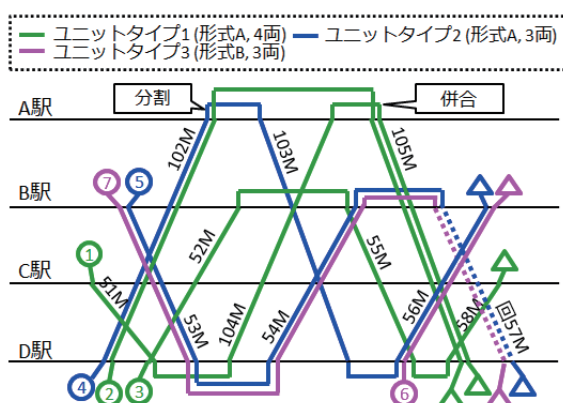


図1 作業の例

＜ユニットタイプ1＞	
1	C ○ 51M D — 104M A — 105M(B) △ D
2	D ○ 102M(B) — A — 105M(F) △ D
3	D ○ 52M <仕業検査> 55M D 58M △ C
＜ユニットタイプ2＞	
4	D ○ 102M(F) A — 103M D — 56M(F) △ B
5	B ○ 53M(B) D — 54M(F) <仕業検査> 回57M(B) △ D
＜ユニットタイプ3＞	
6	D — 56M(B) △ B
7	B ○ 53M(F) D — 54M(B) <仕業検査> 回57M(F) △ D

図2 交番の例

は交番日数とも呼ばれ、それは必要なユニット数に対応し、この例では各ユニットタイプはそれぞれ3ユニット、2ユニット、2ユニットが必要となる。

作業は1ユニットが1営業日内で担当する列車の連なりである。交番における作業数は交番を一巡するのに要する日数であり、同時に必要となるユニット数を意味するため、作業数は少ない方が望ましい。

2.2 災害時の輸送計画作成と車両運用

大規模な自然災害が発生すると、線路や駅・車両基地の設備などが被災し、長期間、長区間の運転取り止めに強いられることがある。このような場合、復旧、運転再開計画に基づき、輸送部門で暫定の列車ダイヤや車両運用計画を作成するが、運転再開日が確定してから当該施行日までは数日程度しかないことも多く、短時間での計画作成を余儀なくされる。また、路線上の複数箇所が被災した場合には、運転区間が被害の規模や復旧の優先度に応じて順次広がることもある。このとき、区間拡大のたびに輸送計画を作成する必要があり、計画担当者もその都度の作業が発生する。

図3に、運転区間拡大の例を示す。この例では、A～H駅間が通常の運転区間である。C～D駅間、F～G駅間が被災して不通となり、復旧作業が必要である。まずは運転が可能な区間から運転再開となるため、再開初日はA～C駅間、D～F駅間での運行となっている（C～D駅間、F～H駅間は運休とする）。ここで、車両基地がE駅隣接だとすると、A～C駅間を運行する車両は車両基地に戻ることができず、孤立区間が生じることもある。また、この例では10日後に全区間運転再開としているが、運転区間拡大がさらに細分化されることもある。

2.3 既往研究

車両運用計画作成に関連する既往研究は欧米を中心に多数存在する。例えば、Alfieri et al.²⁾、Cacchiani et

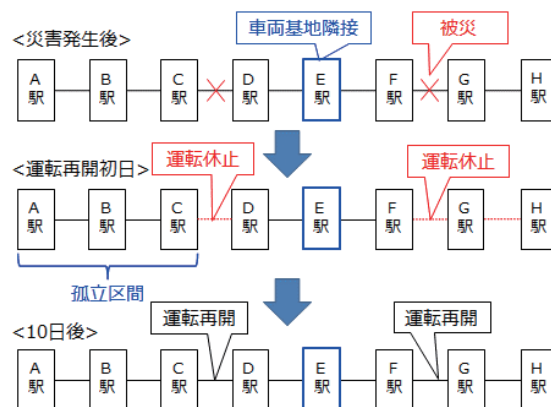


図3 運転区間拡大の例

al.³⁾, Giacco et al.⁴⁾などの研究が挙げられる。近年では、日本国内の路線を対象とした研究も散見される。今泉ら⁵⁾は、仕業作成と交番作成に問題を分割し、それぞれを数理最適化問題として定式化している。Nishi et al.⁶⁾は、仕業検査制約を考慮し、列生成法とヒューリスティックを組み合わせた解法を提案している。加藤ら⁷⁾はGiacco et al.の研究をもとに、巡回セールスマン問題(Travelling Salesman Problem, 以下TSP)としてモデル化し、分割併合回数を低減する考え方を提案している。

一方で、本稿が想定する災害発生後に特化した研究は見られない。また、すでに何らかの計画があり、それに類似する計画作成を指向した研究も、著者らが把握する限り存在しない。よって、ダイヤ改正時を対象とした研究は車両運用計画の作成手法としては参考にはできるが、それに加えて、暫定ダイヤに対する工夫が必要となる。

3. 車両運用計画作成アルゴリズム

3.1 問題定義

2章で述べた災害時の特徴を踏まえ、本稿で扱う問題を定義する。前提条件や制約条件を以下に示す。

- 所与の列車ダイヤ上の各列車に対し、最小両数以上、最大両数以下の車両数を充当するようユニットを充てる。
- 相連続しうる二つの異なる列車間には、着駅・発駅の間にそのまま接続できるか回送を介して接続するかが事前に与えられている。
- 各ユニットタイプには、使用可能数の上限がある。
- 分割併合できる場所(駅)は所与である。
- ユニットタイプ間の併合の可否は所与である。
- ユニットタイプごとに、入線可能線区、充当可能列車が所与である。
- 仕業検査および交番検査を、それぞれ前回検査施行より定められた日数以内に施行する必要がある。交番検査の施行は仕業検査も同時に受けたとみなす。
- 仕業検査および交番検査は、それぞれ可能な箇所が所与とする。検査可能箇所ごとに検査の種類に応じた検査時間帯(仕業検査は一般に複数)が設定されており、検査はその時間帯のいずれかで実施するものとする。さらに、仕業検査には各検査時間帯で同時検査可能なユニット数の上限がある。
- 各駅の留置数には上限がある。ある列車が駅に到着した時点でそれを「留置数1」とカウントするのが原則だが、次の列車への車両の充当のために分割を行う場合はそれが到着時点で起こると仮定し、2ユニットからなる列車が分割される場合は「留置数2」となる。一方、併合は出発時に起こ

ると仮定する。

また、評価指標として、通常の車両運用でも小さいことが求められる「仕業数」、「分割併合回数」、「回送距離」を対象とするとともに、「基本計画に運用が近いかどうか」の評価のために、本研究独自の概念である「運用差異」という概念を導入する。

3.2 運用差異の考え方

「運用差異」を図4の例で説明する。左図は平常時の車両運用計画(以下、基本計画)、右図は災害時に作成した車両運用計画(以下、暫定計画)であり、B駅~D駅間のみ運転再開して暫定ダイヤが作成された場面想定した例である。ここで、基本計画における102M~103MのA駅の折返しに着目すると、暫定計画でも、B駅において、やはり102M~103Mの折返しをしている。このように、折返し駅が異なっても、折返し列車が同様であれば「運用差異なし」とみなす。一方で、折返し列車が異なる場合は運用差異があるとみなす。そして、「運用差異あり」の個数をカウントし、これを小さくする。

本研究では、暫定計画の基本計画との運用差異の抑制を目指す。区間拡大により最終的に基本計画に戻ることから、運転再開の初期段階から基本計画との差異を意識することで、拡大時の運用変更を抑えつつ基本計画へのスムーズな帰着も期待できる。

3.3 本研究のアプローチ

既往研究を踏まえ、車両運用計画の作成手法として、本研究では数理最適化を適用する。解法アプローチとしては、所与の列車ダイヤに示される列車の順序から仕業作成と交番作成を同時に行う「同時解法」と、「仕業作成」、「仕業の順序を決定する交番作成」のように順を追って行う「2段階法」の二つが考えられる。

車両運用計画は仕業だけでなく交番まで作成して完成となるため、全体最適の観点からは「同時解法」の方が望ましい。しかし、問題規模面を中心とした困難さがあることから、「2段階法」も実用性の観点から有力な選

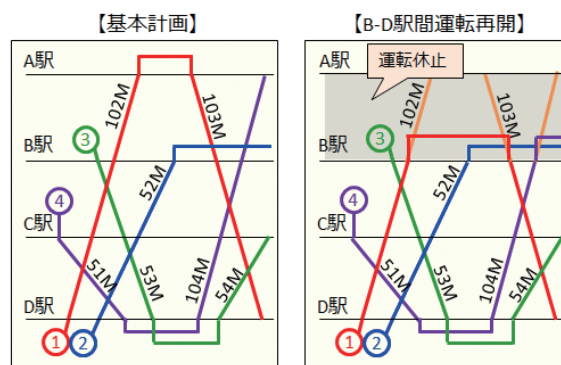


図4 運用差異の考え方の例

択肢となる。本研究では、災害発生後といった時間的制約のある状況を想定しているため、計算時間を優先し、2段階法に基づくアプローチを用いる。

提案アルゴリズムの処理の流れを以下に示す。

Step 1：前処理

入力の列車ダイヤから、被災に伴う運行区間の寸断の有無を確認し、存在する場合には、運行区間ごとに問題を分割する。各運行区間について、Step 2以降の処理を行う。

Step 2：仕業作成アルゴリズム

各ユニットタイプについて、複数の仕業を作成する。仕業作成問題は多品種ネットワークフロー問題によりモデル化する。

Step 3：交番作成アルゴリズム

Step 2で得られた仕業集合を用いて、各ユニットタイプの交番を作成する。交番作成問題はTSPによりモデル化する。

3.1節で述べた評価指標のうち、分割併合は仕業内、仕業間のいずれも発生するため、以下の方法でその回数を低減する。

まず、モデル内の前提として、3.1節 i) で前述したとおり、分割は列車の到着時に、併合は列車の出発時に実施するものとする。その上で、以下の方法により分割併合回数を考慮する。

- ・仕業作成アルゴリズムでは、仕業内の分割併合回数を低減するように仕業を作成する。
- ・交番作成アルゴリズムでは、ある仕業と次の仕業の間で発生する分割併合回数を低減するように交番を作成する。

また、編成内の「前」や「後」といったユニット位置（以下、編成内順序）も運用計画上の決定事項であり、実際には駅構内の配線などによって分割・併合の可否にも影響を与えるが、本研究では自動作成の対象外とする。具体的には、以下のような扱いをしている。

- ・仕業作成アルゴリズムでは編成内順序は考慮せず、各列車の併合の有無・分割併合の回数だけを検出、算出する。
- ・交番作成アルゴリズムの都合上、仕業間での分割併合回数の算出には編成内順序が所与である必要がある。そこで、仕業作成アルゴリズムで得られた各仕業の複数ユニットから成る編成に関して、各ユニットの編成内順序を折返し時には順序を逆にするなどのルールで決め、交番作成アルゴリズムに対する入力とする。

仕業検査、交番検査周期制約については、交番作成アルゴリズムの制約条件として考慮する。しかし、交番作成は仕業作成の結果が入力情報となるため、仕業作成時に必要回数の検査を含めないと、交番作成時に実行不可

能となる。そこで、仕業作成時に、各ユニットタイプについて、作成する仕業数に応じて必要最小限の仕業検査、交番検査を含めるようにする。これにより、交番作成時の実行可能性を保証する。

3.4 仕業作成アルゴリズム

本稿では、車両運用計画のモデル化でよく用いられる多品種ネットワークフロー問題を用いる（たとえば、Cacchiani et al.³⁾）。品種をユニットタイプ、フローを仕業とみなすことで、仕業作成をモデル化する。

ネットワーク上のノードは、列車の始発駅での出発を意味する「出発ノード」、列車の終着駅での到着を意味する「到着ノード」、仕業の開始を意味する「開始ノード」、仕業の終了を意味する「終了ノード」の4種類を設ける。

アークは、列車を意味し出発ノードから到着ノードまで張る「列車アーク」、列車間のつながりを意味し、つながりが可能（駅が一致しており、かつ必要な間合いを確保）な場合に、到着ノードから出発ノードへと張る「つながりアーク」、検査可能な場合に開始ノードから出発ノードへと張る「検査アーク」、開始ノードから張る「開始アーク」、終了ノードへと張る「終了アーク」の5種類を設ける。アークのコストは、列車アークは回送列車であれば a （重みパラメータ）、さもなければ0とし、つながりアークは運用差異を考慮するために、基本計画と同様であれば0、さもなければ β （重みパラメータ）、開始アークは一律1、その他はすべて0とする。

図5にネットワークの例を示す。開始ノードから終了ノードまで各ユニットタイプの複数のフローを流し、各列車アーク上に、最小両数以上、最大両数以下となるようにフローを流す。

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8を参照）。

<目的関数>

アークの総コスト + $\gamma \times$ 仕業内の分割併合回数（最小化する）

なお、 γ は重みパラメータである。

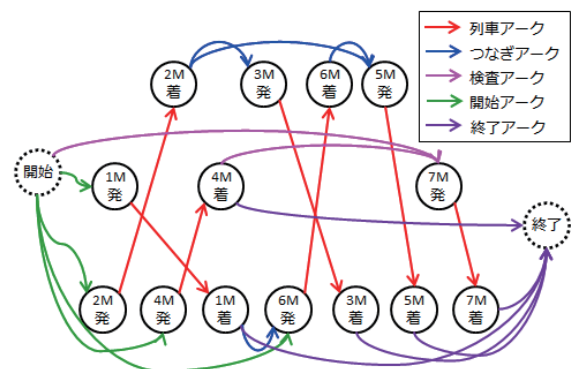


図5 多品種ネットワークフローモデルの例

<制約条件>

- ・フロー整合制約（開始ノード，終了ノードを除き各ノードに入るフロー数と出るフロー数は同一）
- ・各列車への充当両数の上限，下限制約
- ・各ユニットタイプの仕業数制約
- ・仕業検査，交番検査周期制約
- ・仕業検査，交番検査の同時検査数の上限制約
- ・分割併合を検出するための論理制約
- ・ユニットタイプ間の併合不可制約
- ・各駅の留置可能編成数の上限制約
- ・変数の取りうる範囲を定めた制約

3.5 交番作成アルゴリズム

交番作成の数理モデルとして，TSPを用いる。仕業をノード，仕業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，TSPとしてのモデル化が可能である。ここで，アークのコストに回送距離を反映させることで，回送距離の最小化を指向することができる。

また，仕業と次の仕業の間での分割併合回数の低減を考慮する。本稿では，文献7の考え方を取り入れる。ノードに対応する仕業の最初および最後の列車のユニット数および位置（地理的な位置を指し，たとえば西側から1,2,...と定める）の情報を持たせ，接続前後でユニット数が異なるか位置が異なる場合には，アークに対し分割併合のコストを反映させる。接続前後でユニット数が同一かつ位置が同一の場合には，すべての位置で位置1と同列車か否かを論理制約で判断し，異なる場合には分割併合のコストを追加する。

図6にネットワークの例を示す。この例では，3.3節 Step 2の仕業作成で5つの仕業が作成された例としている。各仕業の開始・終了時刻，開始・終了駅が与えられ，これにより仕業間で回送が発生するか否かを把握できる。仕業3，4には仕業検査が含まれており，そこに向けたアークを赤で表記している。このネットワーク上で，

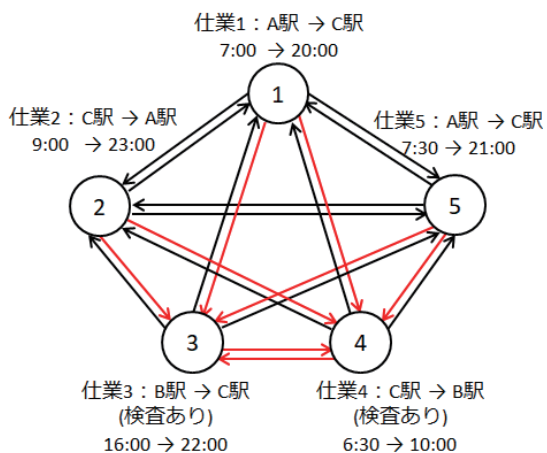


図6 TSP ネットワークの例

全ノードを1回ずつ経由し，仕業検査周期を満たす，コスト最小の巡回路を求める。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8を参照）。

<目的関数>

仕業間の回送距離 + $\delta \times$ 仕業間の分割併合回数（最小化する）

なお， δ は重みパラメータである。

<制約条件>

- ・TSPとしての制約（各ノードに入る巡回路および出る巡回路が1つのみ，部分巡回路の除去制約）
- ・仕業検査周期制約
- ・分割併合を検出するための論理制約
- ・変数の取りうる範囲を定めた制約

4. 数値実験

4.1 検証方法

開発手法の性能を評価するため，過去に実際に発生した大規模自然災害に伴う復旧段階の事例を取り上げ，当時の暫定ダイヤに対し開発手法により自動作成した運用と，当時の運用を比較する。

対象とする事例では，被災により数段階にわたり運転区間が拡大している。このなかで，3つの暫定ダイヤ（インスタンス (a) ~ (c) とする）を検証する。(a)は運転再開の初期段階，(b)はその数日後，(c)は(b)のさらに数日後となっている。問題規模として，列車数およびユニットタイプ数を表1に示す。(a)と(b)ではほとんど変化がないのに対し，(b)と(c)とでは列車数，ユニットタイプ数ともに増加している。この理由は，(c)の段階にて多数の電留線を有する駅まで運転区間が広まり，多数の列車設定が可能となったためである。

当時の運用となるべく近い条件で比較するため，各列車の最小両数，最大両数，充当可能なユニットタイプ等は基本計画や当時の運用をもとに設定した。定式化における目的関数の重みパラメータは一律で $\alpha=0.001$ ， $\beta=0.001$ ， $\gamma=0.1$ ， $\delta=0.01$ とした。計算にはCPUがCore i7-8700K，メモリ64GBの汎用PCを使用し，数理最適化問題の求解にはGurobi Optimizer 9.5.1を使用した。

表1 対象線区の特徴

インスタンス	列車数	ユニットタイプ数
(a)	394	5
(b)	402	5
(c)	572	7

4.2 結果と考察

表2に、インスタンス (a), (b), (c) に対する開発手法の適用結果を示す。評価指標として、仕業数、分割併合回数、回送距離、運用差異数を示す。参考として、当時の運用についても付記する。仕業作成の計算時間の上限は3,600秒とし、その時点での最良解を採択した。交番作成については、いずれも1秒未満で最適解に至り、十分短時間であった。

表2をみると、(a), (b) はいずれの指標も当時の運用と比べてほぼ同等か低減できていて、効率的な計画が作成できている。一方で、(c) では仕業数こそ同等だが、分割併合回数および回送距離は当時の計画より増加しており、効率的とはいえない。特に回送距離が大幅に増加しているが、これはユニットタイプ数が多く、それぞれの仕業数が相対的に少ないため、作成した仕業から交番を作成すると回送が増えてしまうことが原因と考えられる。なお、(c) は3,600秒経過しても計算精度の目安であるGAPも大きくなっていったため、3,600秒では十分とはいえず、計算負荷が非常に大きい問題といえる。

そこで、計算負荷を少しでも軽減することを目的として、仕業数を一律に固定することを考える。これにより、評価指標の項目が減るため、より効率的な探索が可能となり、結果としてよい解を得ることが期待できる。一例として、(c) において仕業数を72~74に固定した場合の結果を表3に示す（仕業作成の計算時間の上限は3,600秒としている）。この結果をみると、仕業数73, 74でも解を得られており、分割併合回数や回送距離は当時の運用と同等か若干多いものの、仕業数が少なく、許容される可能性がある解を得られている。以上より、

表2 開発手法の当時の運用との比較

インスタンス	仕業数	分割併合回数	回送距離(km)	運用差異数
(a)	45	16	296.1	151
(a)*	50	25	145.0	—
(b)	49	16	142.0	164
(b)*	53	34	156.3	—
(c)	72	50	461.6	220
(c)*	75	46	157.5	—

*は当時の運用を意味する。

表3 仕業数を固定した場合（インスタンス (c)）

仕業数	分割併合回数	回送距離(km)	運用差異数
72	34	932.0	212
73	46	514.7	218
74	49	345.1	199

仕業数固定により実行可能領域を狭くすることで、より効率的な計画を得られる可能性がある。

5. まとめ

本稿では、大規模な自然災害発生後の車両運用計画を取り上げ、その暫定ダイヤに対応する計画作成手法を開発した。開発手法では、元の計画と類似する計画作成を陽に考慮することを可能とした。

手法としては数理最適化を採用し、仕業作成と交番作成に処理を分離する2段階法を用いた。それぞれ、多品種ネットワークフロー問題、巡回セールスマン問題によりモデル化することで、高速に求解可能なアルゴリズムを開発した。また、実路線、実事例データを用いた数値実験にて、短時間で実用的な計画を作成できることを示した。今後は、開発手法の他線区での検証を進め、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, A. Schrijver, "Efficient circulation of railway rolling stock," *Transportation Science*, Vol.40, No.3, pp.378-391, 2006.
- 3) V. Cacchiani, A. Caprara, P. Toth, "Solving a real-world train-unit assignment problem," *Mathematical Programming*, Vol.124, pp.207-231, 2010.
- 4) G. Giacco, A. D'Ariano, 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・リサーチ学会和文論文誌, Vol. 53, pp. 14-29, 2010
- 6) T. Nishi, A. Ohno, M. Inuiguchi, S. Takahashi, K. Ueda, "A combined column generation and heuristics for railway short-term rolling stock planning with regular inspection constraints," *Computers and Operations Research*, Vol. 81, pp.14-25, 2017.
- 7) 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
- 8) 加藤怜, 今泉淳, 中東太一, 小久保達也：災害時の暫定ダイヤに対する車両運用計画作成のための最適化アプローチ, 電気学会論文誌D, Vol.143, No.5, pp.405-416, 2023