

# 旅客列車を対象とした 車両運用整理アルゴリズムの開発

坂口 隆\* 佐藤 圭介\*

## Rolling Stock Rescheduling Algorithm for Passenger Trains during Disruption of Train Operation

Takashi SAKAGUCHI Keisuke SATO

Train dispatchers in charge of timetable recovery for passenger trains locally change the assignments of rolling stock at stations during disruption of train operation. The dispatchers in charge of rolling stock globally restore its changed schedule to the original one after the timetable recovery has been completed. This paper discusses the rolling stock re-assignment problem. We have modeled the issue as an integer programming problem with set-partitioning constraints, and solved it by using column generation technique. A numerical experiment using real data has revealed that our method provides a rolling-stock-rescheduling plan of satisfactory quality in acceptable computing time.

キーワード：車両運用，運用整理，数理計画，集合分割問題，列生成法

### 1. はじめに

鉄道旅客輸送において輸送障害が発生した場合、まず適切な駅に列車を停車させて運転再開に備える列車抑止手配が行われ、続いて、運行可能な範囲で列車を臨時に折り返して運行を継続するための運休や運用変更、運転再開後にダイヤを平常に戻すための臨時列車の特発や列車出発順序の変更などを行う。これらの一連の指令業務は運転整理<sup>1)</sup>と呼ばれている。運転整理の初期段階においては、ダイヤを早急に平常に戻すことに専念するため、列車に充当される車両や乗務員については、その列車に使用できるという基本的かつ局所的な条件の下で運用され、このままいくと車両、乗務員がその後どのような行路を辿ることになり、その結果、個々の車両、乗務員の運用に支障がないかどうかのチェックは二の次となる。したがって、ダイヤが平常に復帰した後であっても運用は乱れたままであるため、車両運用、乗務員運用それぞれについて、正常な運用に戻すための運用整理業務が発生する。

このうち、ダイヤ乱れ時の車両運用に関して、これまで鉄道総研では、列車の運休等に伴って車両運用変更案を行う運転整理アルゴリズム<sup>2)</sup>、貨物機関車を対象とした車両運用整理案作成アルゴリズム<sup>3)</sup>などを開発しているが、旅客列車を対象とした車両運用整理については未検討であった。旅客列車は貨物列車と比べ高頻度で運行

され、車両も複数の編成から構成され、また、輸送力確保の緊急性のためリアルタイムな運行情報に基づく必要がある。このような違いをふまえると、旅客列車を対象とした新たな車両運用整理支援の検討が必要となる。そこで本研究では、旅客列車を対象とした車両運用整理業務に関して、運用整理案を自動提案するアルゴリズムとそれを搭載した車両運用整理支援プロトタイプシステムを開発した。アルゴリズムでは、運用整理開始時点での車両位置から始まる、その日の運用終了駅までの充当列車計画を複数生成し、それらを組み合わせることで全ての列車に必ず車両が割り当たるような車両運用整理案を作成するものとして、数理計画問題として定式化した。各車両の充当列車計画の候補は、可能なものをすべて列挙すると数十万といった規模になるため、それらの組合せを試みる方法では、実用的な時間内に妥当な運用整理案を作成するのは困難である。そこで、ダイヤ・運用をネットワークで表現し、列生成法という手法を用いることによって、可能な計画のうちのごく一部を列挙するだけで良質な整理案を高速に作成することを可能にした。

本報告の構成は以下の通りである。第2章では関連する先行研究の調査結果を紹介する。第3章では本研究が対象とする車両運用整理業務と考慮すべき条件について述べる。第4章では前章で述べた問題について、変更ダイヤと車両運用をネットワークで表現することにより、数理計画問題として定式化し、モデル化した問題に対する列生成法を用いたアルゴリズムを述べる。実際のダイヤ・車両運用計画に乱れ事例を適用した計算機実験の結

\* 輸送情報技術研究部 運転システム研究室

特集：輸送情報技術

果を第5章で示す。第6章でアルゴリズムを搭載した車両運用整理支援プロトタイプシステムを提案し、第7章で結論と今後の展望を述べる。

2. 先行研究

過去10年に数多くの車両運用整理の支援や、整理案の自動提案に関する研究開発が行われてきた。

前章で述べた、ダイヤ乱れ時の貨物機関車運用整理案作成アルゴリズムもこれに含まれる<sup>3)</sup>。これはダイヤ乱れ時に輸送指令によって与えられる変更ダイヤを所与として、機関車のけん引力や運用可能範囲、そして機関車形式により72時間ないし96時間おきと定められた仕業検査周期を厳守するという制約を満たしつつ、運用変更や臨時の仕業検査の回数なるべく少ない整理案を自動提案するものである。1日あたり250本強の貨物列車が運行されている区間のダイヤ乱れにおいて、140台の機関車の3日にわたる運用整理案が80秒以内で作成されている。

旅客列車を対象とした文献4)では、一つ一つの運用変更のシミュレーションを繰り返すことにより効率的な運用整理案を自動作成する。文献5)では、運転整理初期段階における折返し列車変更に対してチェックを行う機能と、ダイヤ乱れ当日に運用が完全に所定通りに戻らなかった場合における翌日以降の仕業の充当し直しを行うアルゴリズムが提案されている。文献6)では、運用の実績の把握と運用戻しについて検討がなされている。文献7)は機関車の仕業検査周期超過防止について重点が置かれている。文献8)では、ダイヤ乱れとそれに伴う運用変更によって車両の行路が所定から大きくずれている状況で、それぞれの車両の入区箇所を予測し、翌日以降の仕業を車両に充当し直すアルゴリズムを搭載した車両運用計画システムの開発事例が紹介されている。

海外では車両運用整理に関して数学的な考察を伴った研究がここ数年で行われてきている。文献9)、10)では、本研究の評価指標の一つである「なるべく所定と同じ滞泊駅で運用を終了すること」に重きを置き、所定と異なる滞泊駅で運用を終える車両数を最小化することを目的としている。

3. 車両運用整理

3.1 車両運用整理の業務

ダイヤ乱れ時の旅客列車の運用整理業務は、二つのフェーズに分類することができる。

第1フェーズは支障判定のフェーズである。図1のような所定ダイヤに対し、図2は、輸送障害が発生して列車4Mに遅延が生じた際に、列車1Mへの波及を回避す

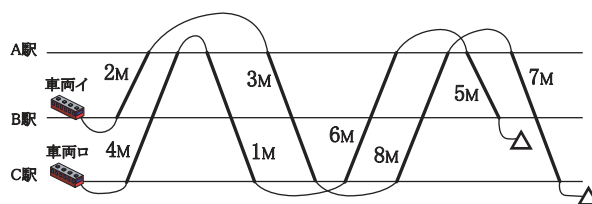


図1 所定ダイヤと車両運用

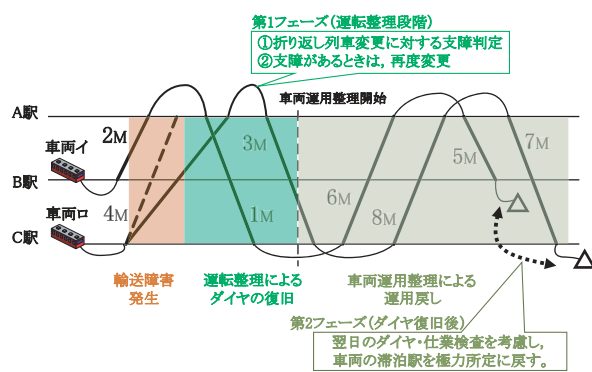


図2 車両運用整理の業務

るように折返し列車を変更する運転整理が行われたケースを表している。このようなケースにおいて第1フェーズでは、折返し列車の変更が以降の列車運行に支障しないことを車両運用の面からチェックし、支障があるときは、再度運用を変更するなどの対応策を立案し、運転整理を支援する。

第2フェーズは、ダイヤが復旧し運転整理が収束した段階において、運転整理によって所定の計画から行路が変わってしまった車両運用をできるだけ元に戻す運用戻しのフェーズである。例えば、図2では運転整理時の折り返し列車変更によって車両が入れ替わり、それぞれの車両の滞泊駅が変わってしまうため、ダイヤ乱れが解消した後、各車両が極力所定と同じ駅で滞泊するように車両運用変更を行う。

3.2 車両運用整理において考慮すべき条件

車両運用整理にあたって考慮すべき事柄について、鉄道事業者へのヒアリングを行い、必ず守らなければならない条件(制約条件)と、できるだけ考慮すべき条件(評価指標)に分けて整理した結果を表1に示す。

条件の整理にあたっては、先行研究として鉄道総研が行った、機関車を対象とした車両運用整理アルゴリズムの研究<sup>3)</sup>において、鉄道共通の条件を整理しているので、これをベースとして、旅客鉄道に固有の条件を新たに抽出した。

制約条件は、「全ての列車に車両を充当する」という大原則と、個々の車両の運用に関するもの、車両を連結して複数編成とする場合の制限、そして、「整理当日の運用を終えた各滞泊駅において、各車両形式の滞泊車両数が

表1 車両運用整理の制約条件と評価指標

	制約条件	評価指標（できるだけ考慮すべき条件）
鉄道共通	全ての列車に車両を充当する 車両の入出区・折返しにあたり必要な時間を確保する 車両の所属区所や車両形式ごとの運用範囲を守る 車両形式に対して充当可能な列車種別を守る 車両ごとに定められた期限内に仕業検査を実施する	所定仕業からの変更が少ない 列車に充当する車両形式を変更しない 所定と同じ滞泊駅で運用を終了する 予備の車両を使用しない 臨時の仕業検査を行わない
旅客鉄道に固有	車両編成長の上限を守る 連結可能な車両形式の車両同士を連結する 滞泊駅での各車両形式の車両数が所定と一致する	列車の編成数（車両数）を変更しない

\* 太字ゴシックは5章の評価試験において考慮した条件

所定の台数と一致すること」により構成される。これは翌日の列車を所定通り運行するために必要な条件である。

評価指標については、まず所定のものから変更を行う仕業をなるべく抑えることが望ましいと考えられる。また、列車に充当する車両形式を変更することも避けたい。翌日以降の運用を考えると、車両はなるべく所定と同じ滞泊駅で運用を終了させることが望ましい。予備車両の使用もできるだけ抑えたい。これらの評価指標はトレードオフの関係にあり、どれを優先するかはダイヤ乱れや対象線区などの状況に依存するため、運転整理支援システムの構成上は担当者がこれらの指標の優先順位を調整でき、それぞれの指標を優先した異なる複数の案を提案できる仕組みが必要となる。

なお、滞泊駅に関する条件は、輸送障害の発生時刻にもよるが、第1フェーズの支障判定において考慮されないことが多く、第2フェーズの運用戻しにおいて主要な条件となる。

## 4. 運用整理案作成アルゴリズム

### 4.1 車両運用整理のモデル化

図2の例において、車両運用整理を開始する時点でのダイヤと車両運用を、図3のようなネットワーク<sup>11)</sup>によって表現する。なお、ここではC駅に使用できる予備の車両が留置されているものとする。ネットワークのノードは、1MとしてC駅に到着した車両イ、3Mに充当され走行中の車両ロ、C駅に滞在中の予備車両ハを表す車両ノード、列車6M、8M、5M、7Mを表す列車ノード、B駅およびC駅での滞泊を表す滞泊ノードによって構成される。ノード間のアークは、到着駅と出発駅とが一致しており、また各駅での折返しに必要な時間を加味して車両が移動可能であれば設定する。

図中の各車両ノードから滞泊ノードまでの任意の経路(パス)が変更仕業の行路候補となる。アークのうち、青色で示したものは所定の運用回しに対応しており、すなわち、これらのアークにより構成されるパスが、車両運

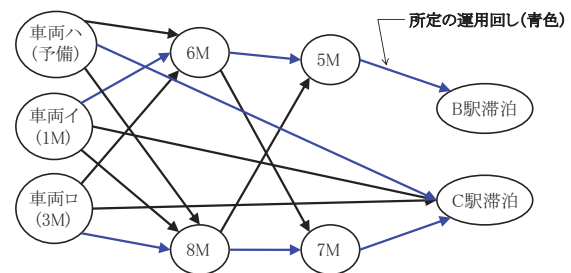


図3 図2に対応するネットワーク

用整理開始時点で予定されている行路を表している。予備車両の車両ノードからそれが滞在中の駅の滞泊ノードに直接リンクするアークは、その予備車両を使用しないことを表し、予備車においてはこれが所定の行路となる。

ネットワークの各アークは、各車両に対応して異なる複数のコストが付与できる構造とする。各車両に対して、はじめに、アークが運用変更にあたるものであれば運用変更の種類・程度を表す正の値を、それ以外は0を設定する。この値(重み)はユーザーが表1の各評価指標の優先度を調節することにより決定される値である。ネットワーク上の車両ノードから駅滞泊ノードへのパスに含まれるアークの重みの和は、行路候補の良し悪しを定量化した値と見なすことができ、これをここでは行路候補の「コスト」と呼ぶ。次に、ある車両が列車に充当されることで運用範囲・編成長・連結・滞泊駅などのいずれかの制約条件に違反する場合は、当該の列車ノードへ接続する各アークに非常に大きなコストを設定する。これにより、4.3節で述べるアルゴリズムと組み合わせることで、制約に違反している行路候補が列挙されるのを避けることができる。

### 4.2 数理計画問題としての定式化

ネットワーク表現とそこから列挙される行路候補を用いて、運用整理を数理計画問題<sup>12)</sup>として定式化する。定式化で使用する集合、値、変数を表す数学記号を表2に示す。

これらの記号のもとで、車両運用整理案を作成する問

特集：輸送情報技術

表2 定式化に使用する数学記号

【所与の集合・値】	
$I$	営業列車（車両運用の単位に分割したもの）の集合
$\hat{I}$	回送列車の集合
$K$	車両（予備を含む）の集合
$P^k$	車両 $k$ の行路候補の集合
$c_p^k$	車両 $k$ の行路候補 $p$ にかかるコスト
$a_{ip}^k$	$\begin{cases} 1 & \text{列車 } i \text{ が車両 } k \text{ の行路候補 } p \text{ に含まれる} \\ 0 & \text{含まれない} \end{cases}$
【変数】	
$x_p^k$	$\begin{cases} 1 & \text{車両 } k \text{ の変更仕業に行路候補 } p \text{ を採用する} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases}$
$s_i$	$\begin{cases} 1 & \text{列車 } i \text{ に車両が充当されない} \\ 0 & \text{充当される} \end{cases}$

題を、組合せ最適化問題のひとつである集合分割問題と呼ばれるモデルに当てはめることにより、次の数理計画問題として捉えることができる。ただし、回送列車の扱いや、各車両の行路の選択に関する制限、および、列車に車両が充当できない場合に対する考慮を加えたことによって、一般的な集合分割問題に対する数理計画モデルを拡張した形となっている。

$$\text{Minimize } \sum_{k \in K} \sum_{p \in P^k} c_p^k x_p^k + M \sum_{i \in I} s_i \quad (1)$$

$$\text{subject to } \sum_{k \in K} \sum_{p \in P^k} a_{ip}^k x_p^k + s_i = 1 \quad \forall i \in I, \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P^k} a_{ip}^k x_p^k \leq 1 \quad \forall i \in \hat{I}, \quad (3)$$

$$\sum_{p \in P^k} x_p^k = 1 \quad \forall k \in K, \quad (4)$$

$$x_p^k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K \forall p \in P^k, \quad (5)$$

$$s_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I. \quad (6)$$

このモデルでは運用変更、滞泊駅の変更、予備車両の投入にかかるコストの総和と、車両が充当できなかった列車のコストを足し合わせたものを評価指標とし、それを最小化することを目的とする（式(1)）。ここでパラメータ  $M$  は、一つの列車に車両が充当できない場合に発生するコストで、他のコストと同じく支援システムにおいてユーザーが値を設定する。全ての列車に車両を充当することは車両運用整理において最も重要視すべきことであり、したがって、通常は  $M$  に非常に大きな値を設定すべきである。しかし、例えばどうしても車両を充当できないような列車が存在するときに、あえて試験的に  $M$  の値を小さくすることで、未充当列車が含まれる整理案を作成することもできる。これにより、車両充当を優先するために例外的で複雑な運用変更を行うか、車両充当を諦めて充当できない列車を運休するというトレードオフが検討できる。式(2)～(6)が制約式であり、式(2)は

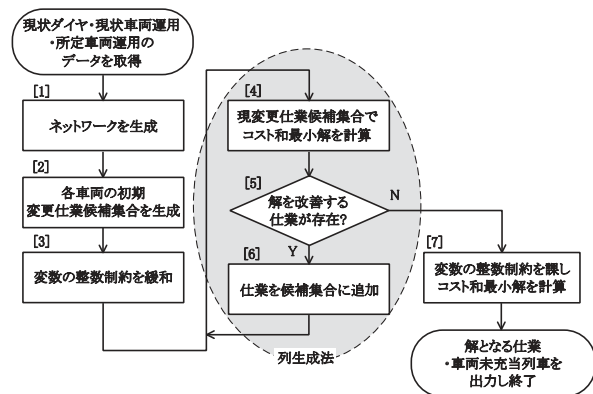


図4 アルゴリズムの概要

全ての列車に車両が充当されるという集合分割制約を表すが、この問題を解いた結果として列車  $i$  がどの車両の仕業にも含まれない場合には  $s_i=1$  をとることによってこの制約式が成立する。式(3)は回送列車の運行に関するものである。回送列車の場合は営業列車と異なり、運用整理の都合によって車両を充当せずに運休することができることを意味する。式(4)は各車両が各々の行路候補からいずれかを一つを選択しなければならないことを課している。式(5)および式(6)は各変数が0か1のどちらかの値をとり、小数であってはならないという整数制約である。

4.3 アルゴリズムの概要

4.1節で述べたように、ネットワークに対して、各車両ノードから駅滞泊ノードまでの経路列挙することで、個々の車両の行路候補の集合を得ることができる。しかし、そのような行路候補の総数は膨大であり、全てを列挙するに膨大な計算時間を要するので、迅速な処理が要求される運用整理にはそのような方法は適さない。そこで、貨物機関車の運用整理の研究<sup>3)</sup>でも用いられている「列生成法」を適用し、行路候補を順次加えながら前節のモデル式を解くアルゴリズムを構築した。列生成法を利用することで、行路候補の全体のうち僅か一部のみが効率的に抽出される。列生成法を含むアルゴリズム全体の概略を図4に示す。

図中の処理[1]のネットワークの生成については4.1節で説明した通りである。処理[2]では車両ごとにネットワークを探索し、コストの低い行路候補を数十個程度列挙する。次に列生成法の制限上、一時的に変数の値が整数であるという制約を緩め（処理[3]）、線形計画問題を解くことにより、初期変更行路候補集合上でコストの総和が最小となる解を算出する（処理[4]）。線形計画には汎用の数理計画ソフトウェアが使用できる。同ソフトウェアから得られる解の情報と列生成法の性質により、現在の解を改善する可能性のある行路が存在するかを判定し（処理[5]）、そのような行路が存在する場合は行路候補に追加する（処理[6]）。処理[4]－[6]を繰り返しこ



特集：輸送情報技術

施する予定の「実施ダイヤ・運用」データを取得し、画面に表示する。

② 実績ダイヤ

軌道回路を通じてリアルタイムに輸送指令の端末に送られる運行実績を本システムにも送ることで、運行状況を考慮した運転整理案の検討を可能にする。

③ 変更ダイヤ・折返し運用

輸送指令が運転整理で行った運休や列車順序変更などのダイヤ変更と折返し列車変更の情報を取り込み、車両運用への支障判定および運用整理案作成に使用する。

④ 変更折返し・入出区運用

駅や車両区所において臨時の変更手配がとられた場合に、それらの変更情報を取り込み、上記と同様の目的に使用する。

⑤ 運用チェック結果

上記の支障判定の結果を本システムのメインユーザーである運用指令の表示端末にて確認する。

⑥ 運用整理案

支障判定の結果、車両運用に支障することが判明した場合、または第2フェーズの運用戻しを行う際、運用指令端末の操作により運用整理案の作成を指示し、これを受けてシステムが運用整理案を作成、提示する。

⑦ 編成が不足する列車スジの情報

上記の運用整理案の作成において、制約をすべて満たす運用整理案が存在しないときは“編成が未充当または不足する列車スジの情報”を提示し、変更ダイヤ・折返し運用の再考が必要であることを輸送指令に通知する。

⑧ 運用戻し要求

ダイヤ乱れが収束に向かった段階で、第2フェーズである運用戻しを行うが、その時期は運用指令の判断による他、車両区所からの要請による場合がある。

⑨ 手動変更ダイヤ・運用

運用整理案の作成は、提案アルゴリズムによる自動作成による他、細部の調整やシステムで考慮していない要望に対応するため、運用指令端末で手動にて修正等の操作ができるものとする。

⑩ 運用整理手配

運用整理によって変更が生じる仕業について、運用指令から関係区所へ運用変更を通知する。

7. まとめ

本研究では、旅客列車を対象とするダイヤ乱れ時の車両運用整理について、数理計画問題として定式化し、列生成法を用いて、最適な車両運用整理案を作成するアルゴリズムおよびプロトタイプシステムを開発した。計算機実験により同アルゴリズムの実用性を検証した結果、ネットワークのコストの設定方法など、パラメータ調整

に関する課題が残るものの、おおむね満足できる質の整理案が許容時間内に得られることが確認できた。

謝辞

研究を実施するにあたり貴重なご意見をいただいた、九州旅客鉄道株式会社の関係各位に深く感謝いたします。

文献

- 1) 電気学会・鉄道における運行計画・運行管理業務高度化に関する調査専門委員会(編):鉄道ダイヤ回復の技術, オーム社, pp.41, 2010
- 2) 富井規雄, 田代善昭, 田部典之, 平井力, 村木国満: 利用者の不満を最小にする列車運転整理アルゴリズム, 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用, Vol.46, No.SIG2 (TOM11), pp.26-38, 2005
- 3) 佐藤圭介, 福村直登: ダイヤ乱れ時の貨物機関車運用整理問題, 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用, Vol.2, No.3, pp.97-109, 2009
- 4) 平井力, 富井規雄, 田部典之: サイバーレールを指向した車両運用計画作成アルゴリズム, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-02-46, 2002
- 5) 原啓太: 車両運用整理支援システムの開発, 第39回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 論文番号410, 2002
- 6) 石原祐介, 矢野誠: 異常時の車両運用支援システムの開発, 第40回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 論文番号408, 2003
- 7) 浅見雅之, 相馬眞, 辺田文彦: 機関車運用整理支援システムの開発, JR EAST Technical Review, No.20, pp.52-53, 2007
- 8) 安本高典, 大槻知史, 永吉申作, 中島正貴: 車両運用計画システムの開発—到着予想に基づくダイヤ乱れへの対応—, 第46回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 論文番号540, 2009
- 9) Nielsen, L.K. and Maroti, G.: “Disruption management of rolling stock in passenger railway transportation,” ERIM Report Series Research in Management, Erasmus Research Institute of Management, Erasmus University Rotterdam, ERS-2009-046-LIS, 2009. <http://repub.eur.nl/res/pub/16557/>.
- 10) Budai, G., Maroti, G., Dekker, R., Huisman, D. and Kroon, L.: “Rescheduling in passenger railways: the rolling stock rebalancing problem,” Journal of Scheduling, Vol.13, No.3, pp.281-297, 2010.
- 11) 藤重悟: グラフ・ネットワーク・組合せ論, 共立出版, pp.36, 2002
- 12) 藤澤克樹, 梅谷俊治: 応用に役立つ50の最適化問題, 朝倉書店, pp.24, 2009
- 13) Gurobi Optimizer: <http://www.octoberkey.jp/products/gurobi/gurobi.html>