

計画間の整合条件を生成する連結ネットワークモデルを用いた 列車ダイヤと構内入換計画の相互連携方式の提案

前川勇樹¹ 富山友恵¹ 佐藤達広¹

概要：鉄道運行サービスを輸送障害から復旧するためには、鉄道運行に関わる様々な計画を相互の整合性を維持しながら修正する必要がある。これまでは高いスキルをもった熟練者が担当していたが、近年の列車ダイヤの過密化・鉄道網の複雑化を背景に、人手による整合性の維持が難しくなり、計画修正業務の非効率化が問題となっている。そこで本研究では、修正対象の計画がいずれもネットワークモデルで表現できることに着目し、計画修正業務を支援する計画間の相互連携方式として、計画変更や整合条件を相互に取り込むことができる連結ネットワークモデルと仲介アルゴリズムを考案した。また、提案手法を用いたアプリケーションとして、列車ダイヤと構内入換計画の計画修正機能を開発した。提案機能を評価するため、国内の中規模路線を模した列車ダイヤおよび構内入換計画1日分のデータを用い、実際の計画修正業務を想定した実験を行った。結果として、計画修正業務で提案機能を利用する場合は、計画をまたがって不整合箇所を修正する手戻り修正の回数を低減できる見込みを得た。

A Method to Mediate Interactions between Rolling Stock Operation and Shunting Operation in Recovery Planning from Disruptions

YUKI MAEKAWA¹ TOMOE TOMIYAMA¹ TATSUHIRO SATO¹

1. はじめに

安定した鉄道運行サービスを実現するためには、定期的な保守作業や安全設備の新規導入によりトラブルを未然に防ぐとともに、輸送障害発生以降の混乱をすばやく収める迅速かつ適切なオペレーションが必要である。

なかでも、鉄道運行の乱れを回復する計画修正業務の効率化は安定輸送実現に向けた重要な課題の一つである[1]。計画修正業務とは、列車の走行計画(列車ダイヤ)や車両・乗務員の運用計画、各車両基地の構内入換計画²など、列車運行に必要な各種計画を相互の整合性を考慮しながら修正していく困難な業務であり、高いスキルをもった熟練者の手によって行われている。これまでの計画修正業務は図1に示すように、列車ダイヤを修正した後に関連計画を修正するという一方向的な業務が主流であり、各計画の担当者は不整合を生じないよう経験と勘に基づいて他計画の動きを想定しながら業務を行ってきた。ところが、近年の列車ダイヤの過密化や相互直通による鉄道網の複雑化を背景に、熟練者であっても予期できない計画間の不整合がしばしば発生している。一度不整合が生じると、以前の計画修正にさかのぼって再修正する「手戻り修正」を行う必要があり、業務の非効率化や復旧時間の長期化を招く恐れがある[8]。よって、効率的な計画修正業務を実現するためには、計画間の変更により起こりうる手戻り修正の発生を防ぐことが課題である。

一方、数理的なアプローチで各種計画を作成する個別の計画自動作成技術は長年研究[3][5][6][7][10][11]されており、実用化検討も進んできている。

本研究では、前述の動向を踏まえたうえで、鉄道運行における計画修正業務を支援する相互連携方式を提案する。特に、車両運用計画を含む列車ダイヤと構内入換計画に焦点を当て、両計画に対応する計画自動作成技術[6][7]を用いて手戻り修正回数を低減する相互連携方式を提案する。提案手法では、鉄道運行に関わる計画はいずれもネットワークモデルで表現できることに着目し、計画変更や不整合を解消するための条件(以降、整合条件と呼称する)を相互に取り込むことができる連結ネットワークモデルと仲介アルゴリズムを開発した。本モデルは両計画で相互に影響しあう情報を仲介するノード(仲介ノード)を保有し、それを介して両計画を表すネットワークを接続することを特徴とする。仲介アルゴリズムは仲介ノードを介した計画変更の伝播方法を定義している。さらに本研究では、上述のモデルとアルゴリズムを活用して、一方の計画を変更した場合に両計画の辻褄をあわせつつ計画修正案を得る計画修正機能を開発した。

以下、2章にて本研究の対象業務を述べ、3章にて関連研究を示す。4章では提案手法および提案機能を説明した後、5章にて提案機能の評価と考察を述べ、最後に6章で本研究のまとめと今後の課題を述べる。

¹ Hitachi, Ltd., Research & Development Group, Center for Technology Innovation – System Engineering

² 車両基地内での各編成の検査作業予定や在線状況を表した計画。

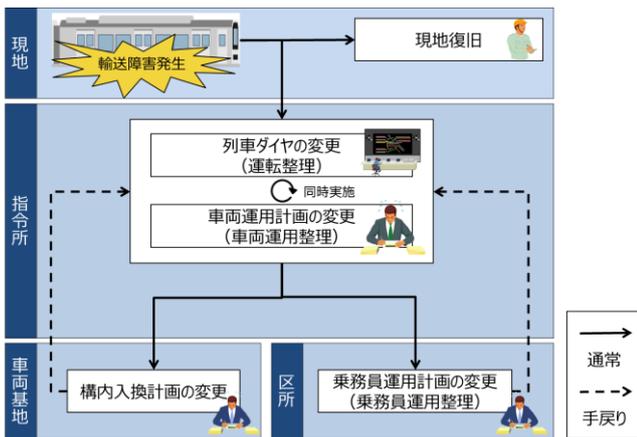


図 1 計画修正業務のワークフロー

2. 対象業務

鉄道運行は列車の出発・到着する駅と時刻を示した列車ダイヤが基本となり、列車ダイヤ中の各列車に適切な車両および乗務員を割当てた運用計画をそろえてはじめて実施できる。本研究では輸送障害発生後に行われる計画修正業務を支援することを念頭に、輸送障害発生以前の列車ダイヤ、車両・乗務員の運用計画が事前に与えられているものと仮定する（以降、元計画と呼称する）。以降では、図 1 に示す計画修正業務の流れを述べた後、本研究の対象について述べる。

輸送障害発生時は、障害発生時刻以降の列車に対して発着時刻変更や順序変更、運転休止、臨時列車設定などの変更を加えて、列車ダイヤを再計画する。この作業は運転整理と呼ばれる。運転整理において、障害規模が小さい場合は発着時刻や順序変更のみで計画の乱れを平復できるが、障害規模が大きい場合は列車の運転休止を含む多くの変更をかけるを得ず、結果として車両・乗務員の運用計画変更が必要となる。これらの作業は車両運用整理および乗務員運用整理と呼ばれ、運転整理によって変更された列車ダイヤに対して、車両や乗務員の現在位置、車両の検査状況、乗務員の休憩有無などを考慮して車両や乗務員を割当てなおす作業である。

車両運用整理と乗務員運用整理は作業内容が類似しているものの、それぞれ扱う対象が異なるため、実施タイミングが異なる。車両運用整理は現在走行中の車両に紐付く物理的な制約が強いため、運転整理と同時並行で実施する機会が多い。このため、運転整理と車両運用整理が同じ担当者である、または異なる担当者であっても同床化して業務にあたっている。例えば、運転整理を行う際、車両運用計画の担当者と口頭で直接相談しながら、各車両の状況をふまえて発着時刻変更や運転休止などを決定している。一方、乗務員は路線内に点在する勤務地（区所）単位で管理されているため、電話や FAX を介して受領した運転整理結

果に対して、各区所の担当者が乗務員運用整理を行っている。

さらに、運転整理や車両運用整理の内容次第で、車両基地への進入・進出する車両やその時刻（入区・出区時刻）が元計画より変更されるため、車両基地ごとに事前に定めた基地内番線の使用計画（構内入換計画）を変更する必要がある。この作業を構内入換計画変更と呼称する。構内入換計画変更は、運転整理または車両運用整理の担当者が電話または FAX を介して構内入換計画の担当者に変更内容を伝えた後に実施される。

ここで、運転整理と車両運用整理は同時並行で行われているにも関わらず、構内入換計画が同時に考慮されていないことに注意する。なぜならば、構内入換計画は車両基地ごとに異なる番線配置や清掃・作業スケジュール、入換ノウハウ等を考慮する必要があるため、計画変更時の判断材料が非常に多岐に渡るためである。ゆえに、運転整理・車両運用整理と構内入換計画変更の二作業間では、一方の変更が他方で不整合を生む可能性が高く、手戻り修正が多く発生し、計画修正業務全体の長期化・非効率化につながる恐れがあった。

本研究では、以上で説明した計画修正業務における計画間の整合性を維持する課題に取り組む。この課題は国内鉄道 [4][9]に限らず、国外（特に欧州）でも報告 [3][8]されており、鉄道運行の安定性を向上するための重要課題の一つに位置づけられる。

3. 関連研究

輸送障害発生時の運転整理や車両運用整理、乗務員運用整理など個別の計画修正案を自動作成する研究 [3] [5][10] [11]は多く取組まれている。一方で、本研究が対象としている、各計画を連携・統合して計画修正業務を一括で支援する研究 [4][8][12]は比較的少ない。以降では、これまでに取組まれた計画連携技術に関する研究について説明した後、本研究の位置づけを述べる。なお、個別の計画自動作成技術に関する説明は略するが、本研究は文献 [3][5][11]で述べられた技術知識を前提としている。

3.1 鉄道運行を司る計画間の連携技術

鉄道運行を担う計画の整合性を維持するために、各計画の数理モデルを統合した一つの数理モデルを構築して一括で計画修正案を得るアプローチが考えられる。このアプローチは連携する計画間で様々な要素の組合せを考慮する必要があるため、構築する数理モデルが複雑かつ大規模になる場合が多い。例えば、列車ダイヤと構内入換計画を統合した大規模な混合整数計画問題を構築して最適解を得ることで、構内入換計画を充足する列車ダイヤの元計画を時間オーダで得る研究 [13]が報告されている。しかし、計画修

正業務はサービス再開を急ぐために迅速に完了する必要があるため、計算時間の観点から前記技術の適用は現実的ではない。

列車ダイヤと車両/乗務員運用計画はシンプルな数理モデルで一括して表現できる[4][12][15][16][17]ことが知られている。これらのモデルは[13]と比較して小規模であるため、計画修正案を実用的な時間（数分程度）で得られる。しかし、計画修正業務で考慮すべき全ての情報を考慮できず、作成された計画修正案は依然として手戻り修正が発生する可能性がある。具体的には、車両/乗務員運用計画を統合した数理モデルでは、もう一方の乗務員/車両運用計画が考慮されていない。また、構内入換計画はまったく考慮されていないか、[17]のように一部の制約しか取り込めていない。

実行可能な計画修正案を得るには、上記で説明したような全ての計画を一括で得るアプローチのほか、本研究が属する分散的に各計画を作成するアプローチが考えられる。現在、後者に関連する研究事例はまだ少ないものの、本研究に近い事例として、例えば列車ダイヤ（車両運用計画を含む）と構内入換計画を分散的に連携し、計画修正案を得る研究[8]がある。具体的には、これまでに開発されてきた車両運用計画と構内入換計画の各計画自動作成技術の適用を前提として、車両運用整理案を構内入換計画で実行できない場合に車両運用整理案を修正するヒューリスティックアルゴリズムを搭載した相互連携方式が報告されている。この方式も手戻り修正回数の低減を期待できるが、構内入換計画において計画が立たなかった車両に限定して車両運用整理案を修正するため、限られたケースでしか整合性のとれた計画修正案を得られないと考えられる。

3.2 本研究の位置づけ

手戻り修正を避けて計画修正案を得るためには、整合性の維持、つまり各計画の制約を充足しつつ計画変更する必要がある。例えば、列車ダイヤと構内入換計画を連携する場合、ある計画変更は車両基地への進入・進出時刻などといった計画間で共通する情報の変更という形でやり取りされ、これらの変更が各計画の制約充足状態を乱す。よって、両計画の制約を常に充足するためには、一方の計画変更に伴う共通情報の変更が他方の計画で制約を充足するかを検証する仕組みが必要と考えられる。また、効率よく計画修正業務を行うためには、前記の検証で制約違反（不整合）があると判断された場合の整合条件を変更元に反映する仕組みがあることが望ましい。

そのため、本研究では計画修正業務において関連する計画同士を接続し、計画変更を仲介するモデルに基づいて、計画間で生じる不整合を避けつつ、複数計画間で並行して計画修正を実施する手法を考案した。

前節を踏まえると本研究の位置づけは次の通りである。

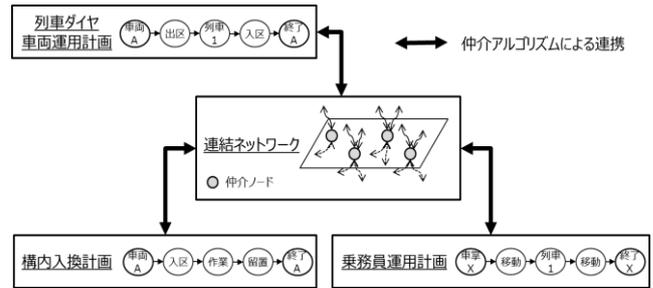


図 2 提案手法の全体像

- (1) 計画修正業務の対象となる各計画で共通する情報を仲介ノードとして各計画を接続し、計画変更を仲介する連結ネットワークモデルを開発した。
- (2) 連結ネットワークモデルを用いて計画間の連携を仲介するアルゴリズムを開発した。これにより、一方の計画で個別の自動計画作成技術を用いた場合も、連結ネットワーク中の仲介ノードの状態に基づいて、他方の計画で分散的に計画を更新できる。
- (3) 提案手法を用いた具体的なアプリケーションとして、列車ダイヤ（車両運用計画を含む）と構内入換計画について、手戻り修正回数を低減した計画修正機能を開発した。

4. 提案手法

4.1 提案手法の概要

本研究では、計画修正業務の対象となる各計画がネットワークモデルで表現できる[2][6][7][18]ことに着目し、計画変更や整合条件を相互に取り込める連結ネットワークモデルと仲介アルゴリズムを提案する。図 2 に提案手法の全体像を示す。本モデルは、両計画で相互に影響しあう情報を仲介するノード（仲介ノード）を事前に保有し、それを介して両計画を表すネットワークを接続することを特徴とする。仲介アルゴリズムは、仲介ノードを介して計画変更を相互に伝播する次の働きを定義している。

- (1) 計画変更箇所に対応する仲介ノードを抽出し、計画間の整合性を維持するための整合条件を生成する。
- (2) 一方の計画において、業務上優先度が高い箇所の固定指定を受け、他方の計画で融通するように計画作成時の整合条件を生成する。

以降では、本研究で対象とした列車ダイヤ・車両運用計画（以降、まとめて列車・車両運用ダイヤと呼称する）と構内入換計画への適用例を示しながら提案手法の詳細について示し、最後に提案手法を用いた計画修正機能について述べる。

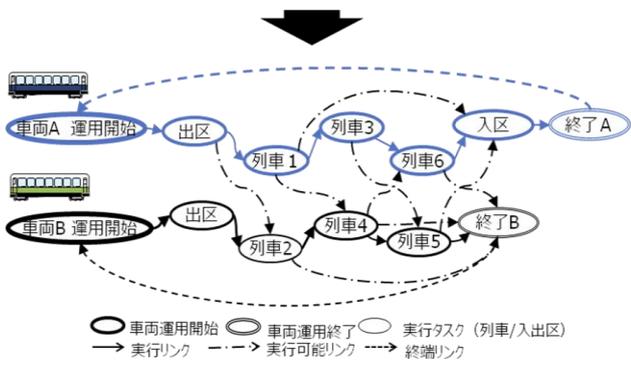
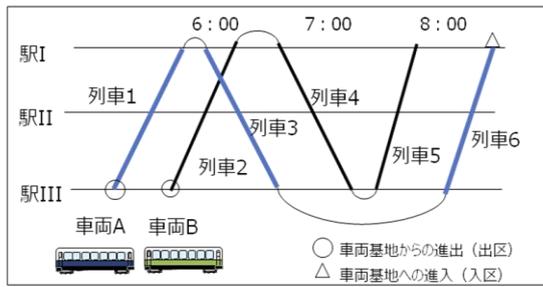


図 3 列車・車両運用ダイヤを表すネットワークモデル

4.2 連結ネットワークモデルの構築

列車・車両運用ダイヤや乗務員運用計画、構内入換計画はそれぞれネットワークモデルとして表現できることが知られている。例えば、列車・車両運用ダイヤでは車両や列車、入出区、運用開始・終了をノードとして表し、車両を始点とする1つの巡回路がその車両に割り当てられる一日の使用予定(仕業)を表すモデル[7]がある。図3に具体例を示す。列車・運用ダイヤ中には車両Aと車両Bが存在しており、それぞれの車両が列車1～6および車両基地への入出区で構成された各実行タスクを実施する計画となっている。実行リンクは元計画として設定された実行タスクの実施順序を示しており、実行可能リンクは元計画から変更して実施可能な実行タスクに接続している。終端リンクは車両の運用開始と運用終了に接続しており、ネットワークモデルで各仕業を表す巡回路を構築している。

連結ネットワークモデルは、図3のような各計画のネットワークを入力として各計画を実行する前に構築する。まず、二つ以上の計画が共有する資源情報に関するノード(共有資源ノード)を登録する。次に、各計画のネットワーク中の実行タスクを表すノードから各計画間で共有する情報を持つものを仲介ノードとして登録する。例えば、列車・車両運用ダイヤと構内入換計画では、本線から車両基地への進入を指す「入区」、車両基地から本線への進出を指す「出区」に該当するノードを抽出する。仲介ノードを抽出する基準は連携する計画によって様々であるが、二つ以上の計画が共有する情報はすべて連結ネットワークモデルに登録する。本研究では、仲介ノードとして「入区」「出区」のみを抽出・登録するものとして説明を進める。仲介ノードの

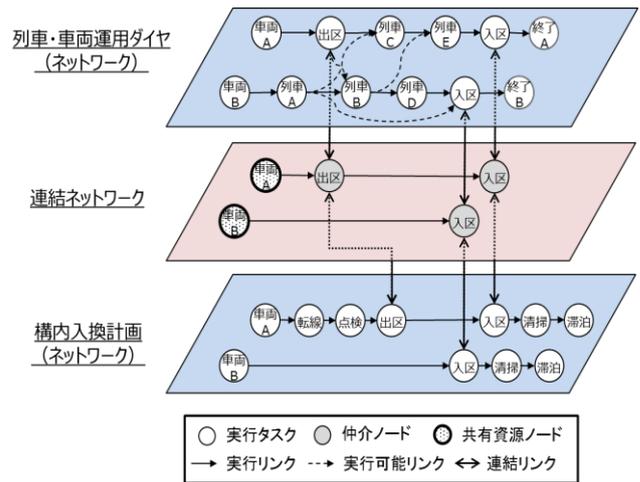


図 4 連結ネットワークモデルの構築例

登録を終えた後は、仲介ノードから各計画中の関連するノードに対してリンク(連結リンク)を設定する。連結リンクは接続された両ノードの識別子情報を含む。次に仲介ノードが持つ資源情報と実施時刻に基づいて実行リンクを設定し、最後に実施時刻の最も早い仲介ノードと共有資源ノードを実行リンクで結ぶ。

上記の手順によって、図4に示すような各計画間の関係性を表す連結ネットワークモデルを構築できる。図4の例では、両計画間で共有する資源を表す車両A/車両Bに関して、両計画のネットワークモデル中の実行タスクである入区/出区を、仲介ノードの入区/出区とそれぞれ連結リンクで接続した連結ネットワークモデルを構築している。

4.3 計画仲介アルゴリズム

本節では、前述の連結ネットワークモデルを活用して、一方の計画変更を各計画に伝播する方法(4.3.1節)、またその変更によっていずれかの計画で不整合が生じる場合に元の計画に整合条件を反映する方法(4.3.2節)について、列車・車両運用ダイヤと構内入換計画の連携を例に説明する。

4.3.1 計画変更の伝播

ある計画にて計画変更が発生した場合、まずその変更内容を連結ネットワーク中の仲介ノードに反映する。計画の変更状況に合わせて、仲介ノードが保有する情報を更新するほか、仲介ノードを追加または削除する。例えば、列車の遅延が発生すると、一部の列車に対して発着時刻の変更や車両基地での検査を取り止めることがある。この場合、列車・車両運用ダイヤの変更に合わせて、仲介ノードで保有する実施時刻(入出区時刻)を更新し、また車両基地での検査が必要/中止になった列車に関する仲介ノードを追加/削除する。ここで仲介ノードの追加/削除は即座に実行せず、他方への計画変更の伝播後に行うよう連結リンクとともに一時退避しておく。

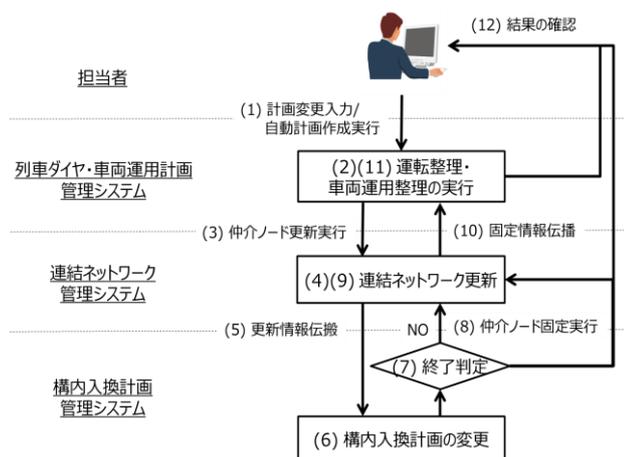


図 5 提案機能による計画修正フロー

次に、仲介ノードの更新内容を他方の計画へ伝播する。仲介ノードに接続された連結リンクの接続先である、他方の計画中の実行タスクに対して情報の更新を行う。また、一時退避しておいた仲介ノードのうち、削除された仲介ノードについては連結リンクの接続先である対象の実行タスクを削除し、新規追加された仲介ノードについては他方の計画中に実行タスクを新規追加した上で連結リンクを設定する。次に、他方の計画を表すネットワークにおいて新規追加・削除された実行タスクに対する実行リンクの再設定を行う。実行タスクが削除された場合はその前後の実行タスクをつなぐ実行リンクを新たに設定し、実行タスクが追加された場合は適切な箇所へ挿入した上で実行リンクを接続し直す。最後に、更新された実行タスクの情報に基づく制約違反のチェックを行い、連結ネットワークの更新によって生じた計画中の不整合箇所を特定する。

4.3.2 整合条件の反映

提案手法では、一方の計画変更によって生じた他計画での不整合を解消するため、いくつかの仲介ノードの情報を固定し、各計画中で変更不可能な実行タスクを明示的に設定することで、他の実行タスクで融通して計画作成できるようにする。固定する仲介ノードの候補は、たとえば各計画において変更不可能としたい重要な実行タスクと連結しているノードである。そのような実行タスクは、路線の特性や輸送障害内容など様々な状況に依存するため、導入する路線の計画修正業務の実運用状況に応じて決定するべきと考えられる。本研究では、「元計画から変更された実行タスク」を優先して固定する仲介ノードとして選択する方針をとる。

4.4 手戻り修正回数を低減した計画修正機能

列車・車両運用ダイヤと構内入換計画を対象に、提案手法を用いた計画修正機能を提案する。図 5 に提案機能によ

る計画修正フローを示し、以降で各ステップの動作を説明する。なお、本機能は、列車・車両運用ダイヤを管理するシステム（列車ダイヤ・車両運用計画管理システム）および構内入換計画を管理するシステム（構内入換計画管理システム）が個別の計画自動作成技術を導入していることを前提としている。本研究では、列車ダイヤ・車両運用計画管理システムは[7]、構内入換計画システムは[6]で述べられている計画自動作成技術を適用する。

- (1) 担当者が輸送障害状況等に基づき、列車ダイヤ・車両運用計画管理システムに対して計画変更を入力し、自動計画作成を実行する。
- (2) 列車ダイヤ・車両運用計画管理システムは所定の計画自動作成技術に基づいて、列車・車両運用ダイヤの計画修正案を作成する。
- (3) 計画修正案の作成後、列車ダイヤ・車両運用計画管理システムが連結ネットワーク管理システムに仲介ノードの更新を要求する。
- (4) 連結ネットワーク管理システムでは列車・車両運用ダイヤの計画修正案に基づいて仲介ノードを更新し、連結ネットワークを更新する。
- (5) 連結ネットワークの更新後、連結ネットワーク管理システムが更新された仲介ノードの連結リンクをたどり、構内入換計画システムへ更新内容を通知する。
- (6) 構内入換計画システムは受け取った更新内容を自計画に反映する。この際、計画中に不整合が生じる場合は所定の計画自動作成技術に基づいて構内入換計画に関する計画修正案を作成する。
- (7) 仲介ノードの更新内容に対応した構内入換計画の計画修正案が得られているならば全体の処理を終了し、担当者に結果を通知する。
- (8) 構内入換計画の計画修正案が得られていない場合は、固定されていない仲介ノードと接続する入区/出区の実施時間を変更できるものとして計画修正案を再作成する。この後、実施時間が変更された入区/出区と接続する仲介ノードの固定を要求する。
- (9) 連結ネットワーク管理システムにて構内入換計画側で要求された仲介ノードの情報を固定する。
- (10) 固定設定を受付けた仲介ノードと接続する列車・車両運用ダイヤの入区・出区の実施時刻を固定とするよう列車ダイヤ・車両運用計画管理システムに要求する。
- (11) 列車ダイヤ・車両運用計画管理システムでは、要求された入区・出区を固定した状態で、所定の計画自動作成技術で列車・車両運用ダイヤの計画修正案を再作成する。
- (12) 得られた列車・車両運用ダイヤおよび構内入換計画の計画修正案を確認する、または計画修正案の作成失敗結果を確認する。

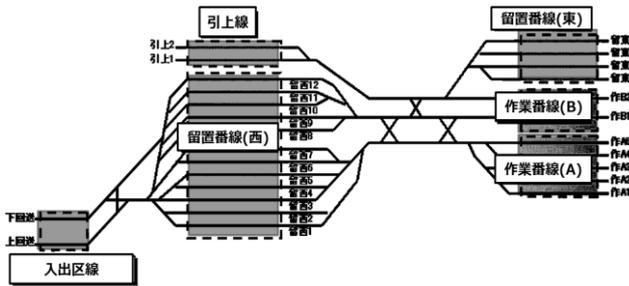


図 6 実験データで想定する車両基地のレイアウト

以上によって、提案機能は列車・車両運用ダイヤおよび構内入換計画の計画修正案を得る。ここで、提案機能は「元計画から変更された実行タスク」を優先して仲介ノードを固定していき、計画修正案を得ることを方針としたため、本研究では上記に示すような計画修正フローを考案した。本来は固定する仲介ノードの選択方針に応じて、連結ネットワークモデルの動作内容を踏まえながら、適切な計画修正フローを策定する必要がある。例えば、列車・車両運用ダイヤを構内入換計画よりも優先する運用とする場合は、列車・車両運用ダイヤの計画修正案の情報で仲介ノードを固定する方針をとる。この場合、提案機能のように構内入換計画の変更を列車・車両運用ダイヤに反映する部分（上記ステップ(8)-(11)）が不要となるため、本方針における計画修正機能は提案機能と異なる計画修正フローとするのが望ましい。

5. 機能評価

5.1 対象と実験環境

提案機能の手戻り回数低減効果を確認するため、列車・車両運用ダイヤの乱れに対する計画修正業務の模擬実験を行い、提案機能の有無による手戻り修正回数を比較した。

実験には、国内の中規模路線を模した車両運用計画および構内入換計画（1日分）である次の表 1 に示すデータを用いた。この実験データでは本線に1つの車両基地（図 6）が隣接している路線を想定している。また、本路線において、ある列車が始発駅でのトラブルによって発車が30分遅延し、後続列車も順次遅延している乱れを想定した。

ここで、実験における手戻り修正回数の定義を与える。手動または自動によって変更を加えた計画を「変更元計画」、変更元計画の変更を反映する先の計画を「反映先計画」として、手戻り修正回数を「反映先計画で生じた不整合を解消するために変更元計画を修正し直す回数」と定義する。なお、今回の実験では変更元計画は列車・車両運用ダイヤ、反映先計画は構内入換計画を指す。

また、提案機能を利用せずに計画修正業務を行う場合の計画修正の流れは以下を想定した。

表 1 実験データ（元計画）

列車・車両運用ダイヤ（本線）	
対象時刻	8:00 - 24:00
列車本数	277
車両数	37
車両運用本数（仕業数）	37
車両基地数	1
構内入換計画（車両基地）	
入出区回数	26
作業予定の車両数	10
入出区用番線数（入出区線）	2
待機用番線数（留置番線）	16
作業用番線数（作業番線）	7
引上用番線（引上線）	2

- (1) 変更元計画の計画修正案を作成する。
- (2) 変更元計画から反映先計画へ、時刻指定で計画変更が行われる。本実験では各車両の入出区時刻が指定される。
- (3) 計画変更を受付けた反映先計画にて計画修正案を作成する。
- (4) 反映先計画にて計画を修正できなかった場合、変更元計画に戻り、変更箇所の時刻を制約違反の発生しない最小時刻だけ前後にずらす。
- (5) 再度、変更元計画から反映先計画へ時刻指定の計画変更を行う。
- (6) 以降、計画修正案が得られるまで(3)-(5)を繰り返す。

5.2 実験結果と考察

実験の結果、提案機能を用いない場合は計3回、提案機能を用いる場合は計1回の手戻り修正が発生した。計画修正案を得るまでの詳細な変更内容を確認すると、提案機能を用いない場合は遅延の影響を受けて車両基地内からの出区が過密となっていた。このため、列車・車両運用ダイヤを修正すれども出区に際する使用進路や使用番線の競合が解消できず、初期の計画修正案から計3回の手戻り修正が発生していた。一方、提案機能を用いた場合は、反映先計画が実行可能となるような出区時刻で仲介ノードが固定・伝播されたため、その後の変更元計画の再修正のみで整合性の取れた計画修正案が得られており、結果として手戻り修正は1回のみであった。

計画修正案を得るまでの上記の流れを踏まえると、提案機能は入区/出区時刻の微細なズレにより発生する手戻り修正回数を低減できていることがわかる。よって、高い頻度で入出区が行われている場面の計画修正業務に対して、提案機能は有効であると考えられる。例えば、もともと入出区回数が多い朝方や深夜での乱れ、列車走行間隔が狭ま

るような大規模な乱れ、高密度な列車ダイヤにおける乱れに対して手戻り修正回数の低減を期待できる。一方、入出区回数が少ない場面では提案機能の効果が小さいと考えられるため、構内入換計画での制約が厳しい場合（線路点検のためにいくつかの進路が長時間使用できない場合など）で手戻り回数を低減できないか、様々なケースを想定した実験を行うことが今後の課題である。

以上より、提案手法およびそれを活用した計画修正機能を用いることで、特に入出区が高頻度で行われる場面の計画修正業務を効率化できる見込みを得た。

6. おわりに

本研究では、列車運行当日の計画修正業務を対象に、複数の計画間で並行して計画修正を実施できるよう計画間を接続する連結ネットワークモデルと仲介アルゴリズムを提案した。また、計画修正の手戻り修正回数を低減するため、上記モデルとアルゴリズムを用いて修正内容の競合を避けて計画間で修正内容を反映しあう計画修正機能を提案した。この機能について実際の中規模路線を模したデータを用いた実験を行い、輸送障害を想定したテストケースにおいて手戻り修正回数が低減できることを確認し、計画修正業務を効率化できる見込みを得た。

提案手法の実用化に向けて、実データによる評価実験を重ね、提案機能が効果を発揮するケースを検証することが今後の課題である。

参考文献

- [1] ON-TIME Consortium: ON-TIME Project (online), available from <http://www.ontime-project.eu/> (accessed 2017-03-01).
- [2] 愛須英之, 大槻知史, 竹葉豊幸: 運行のネットワークモデル化と計画策定支援, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, Vol.57, No.8, pp.414-419 (2012).
- [3] Cacchiani, V., Huisman, D., Kidd, M., Kroon, L., et. al.: An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling, Transportation Research Part B: Methodological, Vol.63, pp.15-37(2014).
- [4] Sato, K.: Freight Locomotive Rescheduling and Uncovered Train Detection During Disruptions, European Journal of Operational Research, Vol.221. No.3(2012).
- [5] 富井規雄, 福村直登, 坂口隆, 平井力: 鉄道のスケジューリングアルゴリズム〜コンピュータで運行計画をつくる〜, エヌ・ティー・エス (2006).
- [6] 佐藤達広, 角本喜紀, 村田智洋: 条件変化に伴う再計画を考慮した鉄道車両基地構内入換スケジューリング方式, 電気学会論文誌. C, 電子・情報システム部門誌, Vol.127, No.2, pp.274-283(2007).
- [7] Sato, T., Sakikawa, S., Morita, T., et. al.: Model and Solution Method for Railroad Crew and Vehicle Rescheduling, Proc. International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (IMECS), pp.1112-1117(2009).
- [8] Haarhr, J. T., Lusby, R. M., Larsen, J., Pisinger, D.: Simultaneously Recovering Rolling Stock Schedules and Depot Plans Under Disruption, Proc. 13th Conference on Advanced Systems in Public Transport (CASPT) (2015).
- [9] 富井規雄, 佐藤圭介: 鉄道のダイヤ乱れ時への対応<その1>, 情報処理学会誌, Vol.4, No.1 (2013).
- [10] 富井規雄, 佐藤圭介: 鉄道のダイヤ乱れ時への対応<その2>, 情報処理学会誌, Vol.4, No.2 (2013).
- [11] 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 (2010).
- [12] 大槻尚弘, 田村啓, 富井規雄: 乗務員及び車両運用の変更を考慮した運転整理案作成アルゴリズム, 平成26年電気学会全国大会論文集, Vol.5, No.106, pp.185-186 (2014).
- [13] Cadarso, L., Marin, A.: Integration of Timetable Planning and Rolling Stock in Rapid Transit Networks, Annals of Operations Research, Vol.199, No.1 (2012).
- [14] Cadarso, L., Marin, A., Maroti, R.: Recovery of disruptions in rapid transit networks, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol.53, pp.15-33 (2013).
- [15] Fekete, S. P., Kroon, L. G., Lorek, M., Pfetsch, M.: Disruption management with rescheduling of trips and vehicle circulations, Proc. 5th ASME/ASCE/IEEE Joint Rail Conference, pp.395-404 (2011).
- [16] Walker, C. G., Snowdon, J. N., Ryan, D. M.: Simultaneous disruption recovery of a train timetable and crew roster in real time, Computers and Operations Research, Vol.32, No.8, pp.2077-2094 (2005).
- [17] Haarhr, J., Lusby, R., Larsen, J., Pisinger, D.: A Branch-and-Price Framework for Railway Rolling Stock Rescheduling During Disruptions, DTU Management Engineering (2014).
- [18] Tomiyama, T., Sato, T., Okada, K., Wakamiya, T.: Rescheduling Algorithm Using Operational Patterns for Rolling Stock Operation at Train Depots, WIT Transactions on The Built Environment, Vol.127, pp.555-566 (2012).