

臨時折返しを含む整理パターンを活用した 運転整理案作成手法

中村 達也* 平井 力**
熊澤 一将** 石原 裕介***

A Practical Train Rescheduling Algorithm Applying Predetermined Factors

Tatsuya NAKAMURA Chikara HIRAI
Kazumasa KUMAZAWA Yusuke ISHIHARA

When an accident or a technical problem disrupts train traffic on a railway line, train dispatchers have to make a series of modifications for the current train timetable to restore it as soon as possible. This is called train re-scheduling. We propose an algorithm to make a practical train-rescheduling plan in a moment. The algorithm uses predetermined factors; train groups, train cancellation sections and turn-back patterns, that form a main frame of a train-rescheduling plan. The algorithm is also simple enough for train dispatchers to recognise how it works. Numerical results indicate that our approach is able to produce a train-rescheduling plan that is almost the same with an actual one operated by train dispatchers.

キーワード：ダイヤ乱れ，運転整理，アルゴリズム，運転整理パターン，臨時折返し

1. はじめに

事故等によってダイヤ乱れが発生すると、元の運行状態になるべく早く戻すため、列車の運休や折返し変更など、列車ダイヤに一連の変更が加えられる。これは運転整理と呼ばれ、列車運行および利用者を含む鉄道システム全体に影響を及ぼす。各種の情報通信機器が導入されており、各列車の位置をリアルタイム表示し、それを見ながら列車ダイヤの変更を画面から入力する支援システムは一般的になっている。しかしながら、最終的な判断は、該当する路線を管理する指令室の担当者（指令）に委ねられているのが現状である。

指令は極めて限られた時間内での意思決定を求められる。これまでの考え方においては、瞬時の判断は指令自身の経験に大きく依存し、判断のタイミングや順序などは、指令担当者により、結果として異なることになる。

また、近年、利用者の多様化したニーズに対応するため、列車ダイヤが複雑化（相互直通列車を増やすなど）しており、他線区との調整など、指令が判断時に考慮すべき事項が増えてきている。更に、熟練した指令のいわ

る職人技の伝承も昨今は難しくなっている。

このような背景のもと、運転整理業務をより体系的なものとするため、運転整理のパターン化に取り組んでいる鉄道事業者もある¹⁾。例えば、列車運行に支障が発生した箇所を避けながら、可能な範囲で列車を運行させるためには、折返し駅などを決める必要がある。このような意思決定手順を、運転整理パターンとして予め決めておくことで、迅速に、一定した対応が可能となる。パターン化を明確には意識していない鉄道事業者においても、同様の決めごとは多く存在している。

運転整理の計算機支援に際して必要なすべてのことを一度に取り扱うのではなく、パターン化されている部分だけに着目することで、現実的な運転整理提案機能が可能になると考えられる。

そこで本論文では、運転整理パターンとして、特に「臨時折返しパターン」に着目した運転整理案作成手法を提案する。運転整理の骨格部分は、パターン適用処理だけで概ね定められる。よって、パターンを計算機に予め適切に準備しておくことにより、原則的にはそれらを適用するだけで、指令の意に沿った運転整理案を瞬時に提案できる。

本論文の構成は次のようになる。次章では従来のアプローチについて述べる。第3章で基本的な考え方を示し、第4章では本手法の中心的概念である列車系統と臨時折返しパターンを導入する。第5章ではパターンを活用した運転整理案作成手法を例示する。第6章で実線区

* 輸送情報技術研究部 運転システム研究室
(現 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部 技術部)
** 輸送情報技術研究部 運転システム研究室
*** 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部 技術部
(現 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

データによる計算実験結果を示し、第7章で今後の課題と進め方を述べる。

2. 従来のアプローチと問題点

列車ダイヤ乱れ時に、運転整理をしない場合の列車運行を単純に予測し、定められた駅での順序変更などを自動提案する仕組みは、一部運行管理システムにおいて既に組み込まれている^{2) 3) 4)}。しかし、これらは総じて局所的な改善を提案するものであり、最終的には指令が介入して修正している場合も多い。全体を見渡してより良い運転整理案を提案する仕組みについては、未だ実用化されるには至っていない。

全体最適を目指した運転整理案作成支援の研究としては、大きくは次の2つのアプローチが試みられている。

2.1 数理工学・シミュレーションの活用

計算機の目覚ましい性能向上に伴い、数理工学やシミュレーション技術を運転整理業務支援に活用する研究が進められている。特にヨーロッパでは、数理工学手法の応用研究が盛んに行われてきている^{5) 6)}。

国内でも、列車の遅延や利用者の動きを定式化し、最適化技術を適用するなどの運転整理案作成手法が研究されている⁷⁻¹⁰⁾。しかしながら次の理由から、実用化は未だ難しいレベルにあると言わざるを得ない。

- (1) 解を得るために省いた要素が無視できない。
- (2) 計算時間が実用レベルには至っていない。
- (3) 基礎データの整備が難しい。
- (4) 指令の整理と比べたときの有用性が理解されにくい。

2.2 指令の知識・手法の活用

一方、指令のノウハウをルール化して計算機に実装するというアイデアに基づく研究も行われてきている¹¹⁾。このような知識を活用するアプローチとして、独自の言語で記述した運転整理パターンを用いて運転整理案を作成する手法が提案されている¹²⁾が、次の問題点がある。

- (1) 言語記述を支援する仕組みが未整備である。
- (2) パターン適用後の処理で整理されていない部分があり、結果として計算時間を要する。

3. 基本的な考え方

前章の各先行研究は、基礎レベルの研究としては一定の成果が得られているものの、特に大都市圏鉄道網のような高密度かつ複雑な運行体系を持つ線区への実導入には多くの課題が残る。一方、複雑な線区ほど、計算機による運転整理業務支援に対するニーズは高く、実用的な仕組みが強く望まれている。

そこで本研究では、現状の運転整理業務を体系的に整理し、先行研究の成果レベルを勘案した上で、一度に全体のシステム化を図るのではなく、既に技術が確立している部分のみ計算機に提案させることを考える。実用化が難しい部分は現行業務のままとし、数年後に無理なく導入できる仕組みの構築を目指す。

運転整理業務では、列車ダイヤや車両運用などの変更計画作成、関係箇所への連絡、運行管理システムへの変更入力などの作業が複雑に絡み合っている。刻々と変化する状況に迅速な対応をするため、大規模な鉄道網を管理する指令室では大勢の指令が役割を分担し、協調して業務を遂行している。

図1に、指令室における運転整理業務フローを示す。指令の役割は、指令長と指令員が担当する2つの業務に分けることができる。指令長は、運休列車など、運転整理の全体に関わる意思決定をする。指令員は、指令長の意思決定を実現させるため、列車の使用番線変更や、(発)順序変更など、比較的詳細なレベルの判断をし、運行管理システムへの変更入力をする。乗務員区を別の枠に示しているが、運転士および車掌の乗務変更については、現業機関側の判断を優先することが前提である。

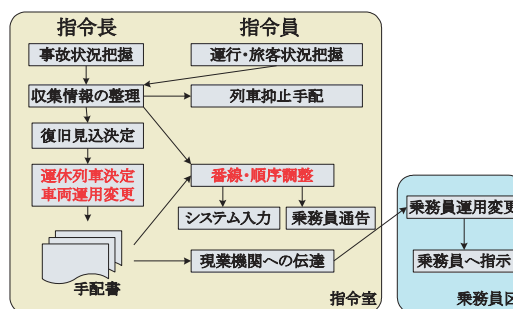


図1 運転整理業務フロー

図1において、本研究の対象を次のように考える。

- (1) 「運休列車決定・車両運用変更」に運転整理パターンの考え方を適用し、支障区間と復旧見込みを入力することで、予め準備してあるパターンに基づき、システムが自動提案する仕組みを構築する。
- (2) 「番線・順序調整」には、数理工学等の技術を用い、(1)と組み合わせた提案を可能とする。具体的には、2.1節で触れた技術⁷⁾を部分的に活用し、発順序変更等を提案する。

また、2.2節で述べた問題点に対し、本研究では次のように対処する。

- (1) 言語記述を支援する仕組みを整備し、運転整理パターンの編集を可能とする。
- (2) 「遅延承知列車」として、当面は遅延を許容せざるを得ない列車への対応を明確にし、パターン適用後の遅延回復処理を追加する。

次章以降では、(2)の対処を含む本手法の概要を述べる。

4. 列車系統と臨時折返しパターン

本論文の冒頭で述べた運転整理パターンの考え方を踏襲し、運休とそれに伴う車両運用変更を瞬時に提案するアルゴリズムを次に示す。中心となるのは「列車系統」および「臨時折返しパターン」として事前に与える情報である。運転整理パターンを活用した過去の研究¹²⁾に因み、このアルゴリズムをR+（アールプラス）と呼んでいる。

4.1 列車系統

R+では、「運用まわし」が可能な列車を、予め「列車系統」としてグループ化しておく。

運用まわしとは、例えば、ある列車が前途運休になって折返す際、どの列車として折返すかを定めることである。折返さない場合（継走する場合）でも、ある駅から別の列車となる場合は、運用まわしが定められることになる。図2に簡単なダイヤ図で例を示す。横軸は時刻、縦軸は駅の位置、斜め線は列車である。

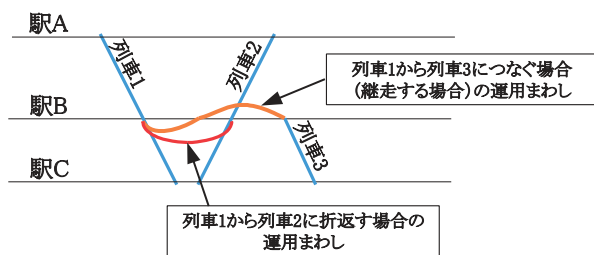


図2 運用まわし

図3に、以降の説明で用いるダイヤ図の例を示す。駅A～B～C～Dからなる線区で、急行・快速・普通の3種類の列車が走行する。ダイヤ乱れ時には、車両形式や定員を合わせるため、同じ種類の列車間で運用まわしをする。

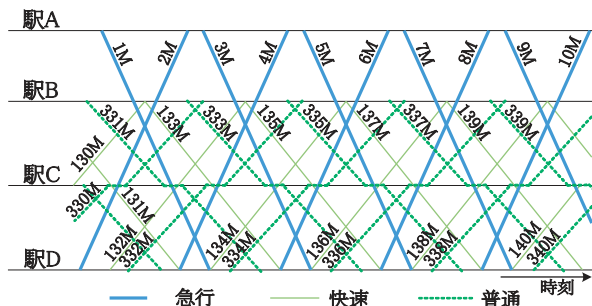


図3 列車ダイヤの例

ここでは、表1に示すように、列車系統が種別毎に定義されているとする。ただし一般には、列車系統と種別が一致するとは限らない。種別が異なる列車でも、運用まわしが可能であれば、同じ列車系統にグループ化される。種別が同じでも、車両運用の都合等で運用まわしができない場合は、別の列車系統に属することになる。

原則として、ある列車は、ある列車系統に属する。ど

表1 列車系統の定義例

列車系統	列車番号
急行列車系統	1M, 2M, 3M, 4M, 5M, 6M, 7M, 8M, 9M, 10M, …
快速列車系統	130M, 131M, 132M, 133M, 134M, 135M, 136M, 137M, 138M, 139M, 140M, …
普通列車系統	330M, 331M, 332M, 333M, 334M, 335M, 336M, 337M, 338M, 339M, 340M, …

の列車系統にも属さない列車に対しては、次に述べる臨時折返しパターンが設定されないことになる。

4.2 臨時折返しパターン

列車運行に支障が発生した箇所により、列車系統毎に、運休する区間と折返す駅を予め定める。実線区でも、このように定めてあることが多く、本手法ではそれらを踏襲している。

図3の線区で表2の運転整理パターンが決められているとする。これに従うと、駅B～C間で列車支障が発生した場合、急行列車系統と普通列車系統は駅B～C間で運休となる。そこで、図4の円弧で示す運用つなぎ（折返し）を車両運用の都合等を考慮して定めることができる。これを「臨時折返しパターン」と呼ぶ。同じ列車系統内の列車間で折返す列車のペアを定めており、例えば、急行列車系統の1Mは、駅Bで2Mに折返すことになっている。

表2 運転整理パターンの例

列車系統	支障発生区間		
	駅A-B間	駅B-C間	駅C-D間
急行列車系統	駅A-B間 運休	駅B-C間 運休	駅B-D間 運休
快速列車系統	運行継続	全区間運休	全区間運休
普通列車系統	運行継続	駅B-C間 運休	全区間運休

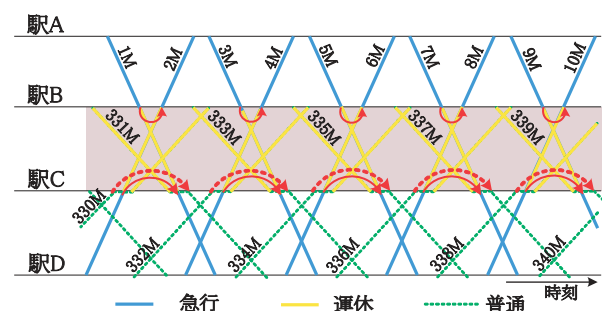


図4 駅B～C間支障時の臨時折返しパターン

4.3 用語

運転整理案作成手法を示すにあたり、表3の用語を更に定義する。

表3 用語の定義

用語	定義
列車支障区間	事故が発生し、列車が走行できない駅間
列車支障ゾーン	列車支障区間と、列車が走行できない時間帯とに囲まれたダイヤ図上でのゾーン

特集：輸送情報技術

運休対象区間	臨時折返しパターンの適用時に、列車支障区間をはさんだ、列車を走行しないようにする駅間
臨時折返し対象駅	運休対象区間の端駅で、運休対象区間を走行しないように、外方に列車を折返す駅
パターン手配開 始可能時刻	列車支障が発生後、連絡等がつきパターンとしての 運転整理を施すことが可能となる時刻
遅延承知列車	運休手配が間に合わない等の理由で、運休対象区間 に、遅れ承知でやむを得ず走行させる列車
事故後続列車	列車支障ゾーン後に運休対象区間を通る列車

5. 運転整理案作成手法（アルゴリズム）

R+を中心とした運転整理案作成手法を、図3の列車ダイヤを用いて例示する。簡単のため、まずは急行列車系統の列車に着目する。

本手法への入力は、列車支障区間・方向、支障発生時刻、復旧見込み時刻となる。これらに対し、臨時折返しパターン適用を中心に、運転整理案を作成する。

5.1 運休列車決定

図5はアルゴリズムによる最初の判断となる運休列車決定を表す。支障発生は×で示されており、その時刻に駅B～C間で両方向が支障している。与えられた復旧見込み時刻に基づく列車支障ゾーンを長方形で表す。

運休対象区間は駅B～C間であることから、列車支障ゾーンにかかる1M, 2M, 3M, 4Mの駅B～C間が運休候補となる。しかしながら、既に駅Cを出ている2Mのように、運休の手配が間に合わない列車は遅延承知列車となる。両方向の本数を合わせるため、2Mと同方向である列車6Mの同区間が運休されることになる。

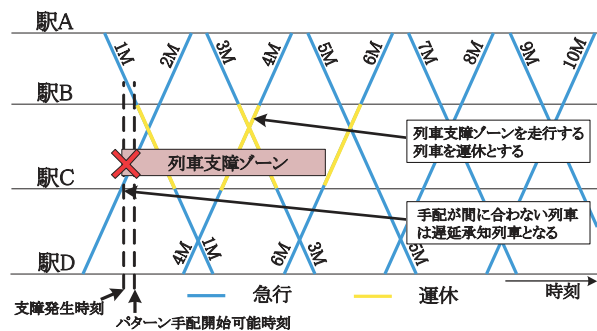


図5 急行列車系統に対する運休列車決定

5.2 臨時折返しパターン適用と運用未定列車取り出し

図6では、運休列車決定を受けた後の臨時折返しパターン適用を示す。駅Bでは1Mから2Mへ、3Mから4Mへの運用まわしが決まる。2Mは遅延承知列車なので、駅Bで「切断」され、駅B～A間だけを走行する2Mに、1Mから運用まわしが設定される。3Mおよび4Mは既に駅B～C間が運休となっているので、臨時折返しパターンが

そのまま適用される。

駅Cでは、4Mから3Mへの運用まわしが決まる。6Mから5Mへの運用まわしは、5Mを駅Cで切断して設定することになる。

これらの手順を経た結果、図6中の●で示す「前運用未定列車」、▲で示す「後運用未定列車」が決まる。それぞれ、前の列車が決まっていなかったため運行する車両がないこと、後の列車が決まっていなかったため運行後に車両が余ることを意味する。

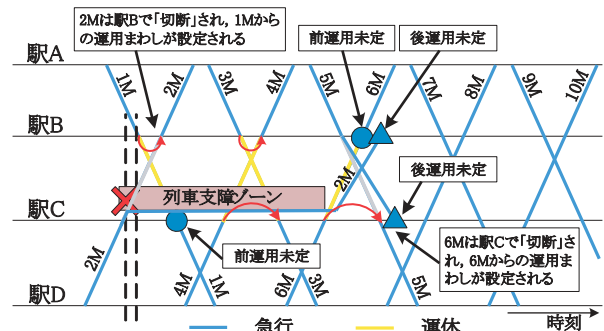


図6 臨時折返し設定・列車の切断・運用未定取り出し

5.3 運用未定列車への対処

ここまでの手順で、運転整理の骨格である運休決定と、それに伴う運用つながりが決まる。次のフェーズでは、前運用未定列車と、後運用未定列車の対処をする。基本的には、車両が余っている後運用未定列車から、車両がない前運用未定列車に運用つながりを時刻順に設定すればよい。結果としては、図6中の▲から●をつなぐ。しかし、列車の順序を考慮しなければならない点に問題が生ずる。

図7では、駅Bで2Mから6Mに運用つながりが設定される。一方、駅Cで5Mから1Mへの運用つながりをするためには、駅C～D間で1Mの順序変更を考慮する必要がある。本アルゴリズムでは、シミュレーションによる列車運行予測機能を用いた順序変更により、この問題に対処している。

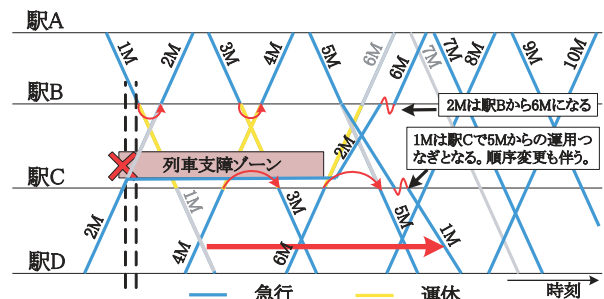


図7 運用未定列車に対する運用つながり

5.4 各列車系統に対する案の重ね合わせ

急行列車系統に対する運転整理案を作成したが、快速列車系統、普通列車系統に対してもそれぞれに臨時折返しパターンを適用した案を作成する。そして、図8に示

すように、各列車系統の結果を重ね合わせる。このとき、例えば楕円で示すように駅Zでの順序変更を行うことで、全体の案を調整する。本アルゴリズムでは、既存技術⁷⁾の一部を活用してこの順序変更案を作成している。

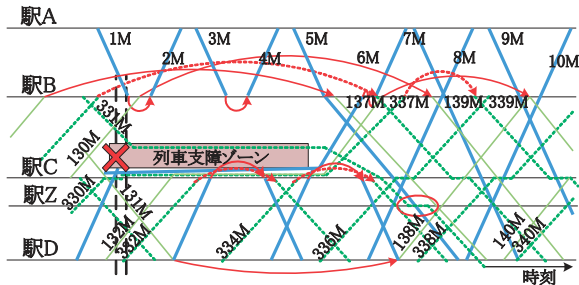


図8 各列車系統の重ね合わせと順序変更

5.5 アルゴリズムの全体

本提案アルゴリズムの概要を改めて示すと次のようになる。

- (1) 運休列車決定 [図5]
 - (2) 臨時折返しパターン適用 [図6]
 - (3) 運用未定列車取り出し [図6]
 - (4) 運用未定列車への対処 (順序変更を含む) [図7]
 - (5) 各列車系統の重ね合わせ (順序変更を含む) [図8]
- ここで、(1)～(3)がR+に相当する。(4)については、RC (CはConnectionを意味する)と呼ぶ。

なお、このアルゴリズムが運転整理案を作成する際に遅延承知列車とした列車は、継走方向の運用つながりを設定するなどしているが、遅延を持ったまま運行することが考えられる。よって、上記に引き続く(6)として、遅延列車の回復を考慮する必要がある。詳細は紙面の都合上、割愛する。

6. 計算実験

本手法の有効性を確認するため、実線区のデータを用いた計算実験と評価を実施した。実際に行われた運転整理結果と、本手法が提案した案とを列車ダイヤ図で視認するとともに、比較対象とする運転整理案それぞれについて、利用者不効用値を比較する。

6.1 実験対象および評価方法

実験対象は次の支障とそれに対して実際に行われた運転整理である。

- ・ 大都市圏の通勤線区の休日ダイヤ
- ・ 15時45分ごろから約1時間の支障発生
- ・ 当該時間帯には1時間あたり、上下各方向に快速列車6本、普通列車6本が運行

これを事例とし、所定のダイヤ、運転整理をしない場合の予測ダイヤ、本手法 (R+, RC, 順序変更) 適用ダイ

利用者不効用値 = 列車乗車時間 (秒)
 + 2 × ホーム待ち時間 (秒)
 + 600 × 乗換回数
 + Σ (駅間走行時間 (秒) × 混雑度式)

※混雑度式

- ・ 混雑率0～100% : 0.027 × (混雑率[%] / 100)
- ・ 混雑率100～150% : 0.0828 × (混雑率[%] / 100) - 0.0558
- ・ 混雑率150～200% : 0.179 × (混雑率[%] / 100) - 0.2
- ・ 混雑率200～250% : 0.069 × (混雑率[%] / 100) - 1.22
- ・ 混雑率250%以上 : 1.15 × (混雑率[%] / 100) - 2.37

図9 利用者不効用値の計算式

ヤ、実際の運転整理ダイヤの4ケースを比較する。

評価指標として、図9に示す利用者不効用値を用いる。これは、国土交通省が監修するマニュアル¹³⁾に記載されている費用便益分析の一部を、時間換算で算出する形にしたものである。

利用者不効用の算出には、列車運行と旅客行動を推定するシミュレーションシステム¹⁴⁾を用いる。自動改札機等から収集したOD (Origin-Destination) データをもとに、列車運行に従って利用者一人一人の行動を推定し、各利用者について利用者不効用値を算出する。

6.2 評価結果

図10から図13に各ケースの結果ダイヤを示す。図10の所定ダイヤに対し、図11は発生した支障に対して運転整理をしなかった場合を予測したダイヤである。支障発生後は線区全体にわたり1時間以上列車が運行していない時間帯が存在する。

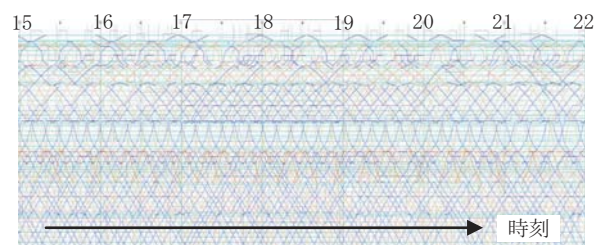


図10 所定ダイヤ

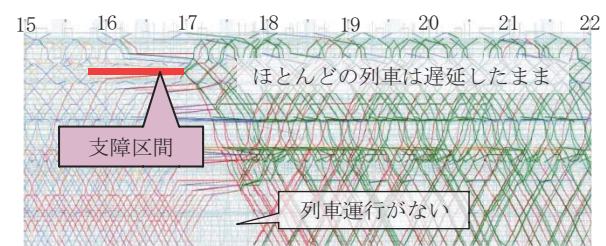


図11 乱れ予測ダイヤ (運転整理なし)

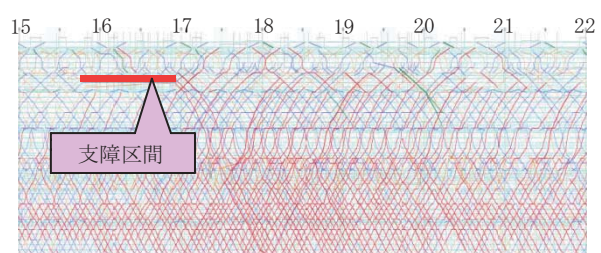


図12 本手法が提案した運転整理ダイヤ

特集：輸送情報技術

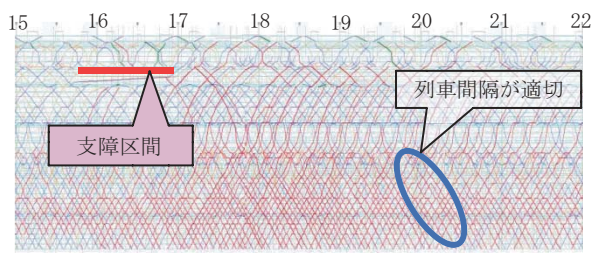


図13 指令による実際の運転整理ダイヤ

図12は本手法を適用した場合の予測ダイヤであり、図13は実際の運転整理を再現したダイヤである。これら2つのダイヤは、楕円で示した部分で、図13の実際のダイヤの方が適切な列車間隔となっているが、全体的にはほぼ同様のダイヤになっている。

利用者不効用値の算出結果を表4に示す。図12および図13より、本手法によって指令が実施した内容とほぼ遜色のない結果が得られることがわかるが、利用者不効用値においてもほぼ同等の運転整理案が得られていると言える。実際、R+（運休決定・臨時折返し決定）で算出した内容は、指令による手配とほぼ同じものであった。指令はこの手配を作成するのに十数分程度の時間を要するが、表5に示すように、R+では1秒未満で算出している。

表4 利用者不効用値による比較

ケース	利用者不効用値 (平均)
所定ダイヤ (図10)	1307.3
乱れ予測ダイヤ (図11)	2256.3
本手法の提案 (図12)	1349.0
実際の運転整理 (図13)	1362.5

表5 計算時間

モジュール	計算時間 [秒]
R+	1秒未満
RC	35
順序変更	40

7. まとめ

本論文では、現実的な運転整理を短時間で提案可能とする手法を提案した。

実用化に向けては次の課題が残っている。

- ・ 終電間際の列車の取扱い
- ・ 支障時間が延長となった場合の処理方法
- ・ 支障が重複して発生した場合の処理方法
- ・ 列車系統および臨時折返しパターンを作成を支援する仕組みの構築

5.5節でも触れたが、遅延承知列車に対する遅れ回復対策の問題がある。今回は比較的簡易な順序整理アルゴリズムを用いたが、2.1節で述べた先行研究をこの部分に絞って適用することも考えられる。更に、遅延承知列

車1本ごとに着目し、終点より手前の駅で折返すこと（いわゆる「ヤマギリ」）により遅延を回復する手段についてもアルゴリズム化を進めている。

今後はこれらの課題に取り組むと同時に、具体的な線区事例による実用化検証を進めていく。

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:鉄道ダイヤ回復の技術, オーム社, 2010
- 2) 伊藤正樹: 相模鉄道株式会社列車運行管理システム (TTC), 鉄道車両と技術, Vol.18, No.8, pp.35-39, 2009
- 3) 牛田貢平: ダイヤ乱れへの対処とその課題(東京地下鉄の場合), 平成21年電気学会産業応用部門大会, 3-S13-2, 2009
- 4) 松本康宏: 阪神電鉄における運行管理システムの構築事例, 平成21年電気学会産業応用部門大会, 3-S13-5, 2009
- 5) Törnquist, J., "Computer-based decision support for railway traffic scheduling and dispatching: A review of models and algorithms," The 5th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways (ATMOS 2005), 2005.
- 6) Corman, F., D'Ariano, A., Hansen, I.A., and Parciarelli, D., "Optimal multi-class rescheduling of railway traffic," Proceedings of the 4th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis (RAILROME 2011), Rome, Italy, February 16-18, 2011.
- 7) 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 (SIG 2 (TOM11)), pp.26-38, 2005
- 8) 原和弘, 熊澤一将, 古関隆章: 乗客流解析に基づく運転整理支援システムにおける整理案の効率的評価・最適化法, 平成19年電気学会産業応用部門大会, 3-29, 2007
- 9) 國松武俊, 平井力: 利用者デマンドを考慮した運転整理案作成アルゴリズムの開発, 鉄道総研報告, Vol.23, No.8, pp.17-22, 2009
- 10) 千種健二, 佐藤圭介, 古関隆章: 数理計画法に基づく旅客の観点から見た異常時列車運行計画の最適化, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-10-057, 2010
- 11) 駒谷喜代俊, 福田豊生: 列車運転整理支援のエキスパートシステム, 人工知能学会誌, Vol.3, No.1, pp.26-31, 1988
- 12) 平井力, 富井規雄, 田代善昭, 近藤繁樹, 藤森淳: 運転整理パターン記述言語Rによる列車運転整理案作成アルゴリズム, 情報科学技術レターズ (FIT2005), Vol.4, LF-001, pp.85-88, 2005
- 13) 国土交通省鉄道局監修: 鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル2005, 財団法人運輸政策研究機構, 2005
- 14) 國松武俊, 平井力, 富井規雄: マイクロシミュレーションを用いた利用者の視点による列車ダイヤ評価手法, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), Vol.130, No.4, pp.459-467, 2010