

列車順序変更計画へのルール抽出技術の適用

坂口 隆* 佐藤 圭介**

Application of Rule Mining Technology for the Rescheduling of Train Order

Takashi SAKAGUCHI Keisuke SATO

One of the technical problems on computational support for the rescheduling of train order is a reflection of conditions or criteria of the judgement which are tacit knowledge that dispatchers have acquired from their experience in conventional rescheduling systems. Therefore, we have developed a method of deriving operations which were performed by dispatchers with high probability under specific conditions as operation arrangement rules (OARs) from operation performance records. Then, we have built a train order rescheduling algorithm which has a reflection mechanism of OARs and confirmed the usability of the rescheduling approach by using OARs by comparison between the actual operation arrangement result and the computational output.

キーワード：ダイヤ乱れ，運転整理，順序変更，系列ルールマイニング，相関ルール，数理最適化

1. はじめに

事故や悪天候などにより自然回復が困難なレベルの列車ダイヤの乱れが発生すると，計画の変更や列車運転間隔の調整により回復を図る運転整理が行われる。運転整理では，事前に策定された基本方針の他，個別の事象に対しては，乱れの原因，発生箇所，時間帯などを踏まえ，計画変更による他の列車や旅客への影響などを総合的に勘案しつつきめ細かな実施判断が要求される。

鉄道総研では，運転整理を情報技術により支援する研究を行っており，数理最適化技術を用いて運転整理案を自動作成する手法を提案している¹⁾。これはあらかじめ設定した定量的な評価指標の下で最適な運転整理案を求める手法であるが，定量的な評価指標への反映が難しい指令員の知識やノウハウが存在し，それらを考慮することによる実用性の向上が課題であった。そこで本研究では，過去の運転整理実績を分析することで，指令員の知見をルールの形で抽出し，それら反映した運転整理案を自動作成する手法を開発した。

本稿では，開発した手法の概要と検証試験の結果について報告する。

2. 本研究の対象

2.1 列車順序変更計画

運転整理においては，ダイヤ乱れの規模によってダイヤを回復させるために必要なダイヤ変更の手段が異な

る。小規模な遅延では，一部の列車に対する走行間隔の調整（間隔調整），駅間や平面交差などの列車走行順序の変更（順序変更），始終着駅や停車駅の使用番線の変更（着発番線変更）などの局所的な整理によってダイヤを回復可能である。一方，大規模な遅延では影響範囲が広いので，まず指令間協議によって運休列車の決定や運用変更などの大枠の整理内容を決定し，それを受けて各線区指令の担当が小規模遅延時と同様の詳細な整理を行う²⁾。本研究では，大規模遅延時の大枠の整理内容が決定した後や小規模遅延時に線区指令卓で行われる詳細な整理を対象とする。本稿では，このような詳細な運転整理における間隔調整や計画変更などを総称して，列車順序変更計画と呼ぶ。

2.2 列車順序変更計画の作成手法と課題

列車順序変更計画に対するコンピューターの支援としては，計画案の好ましさを表す定量的な評価指標を設定し，個々のダイヤ変更の組み合わせの中から指標値が良い案を求めるアプローチが一般的である。鉄道総研ではこれまで同アプローチに基づいた運転整理案作成アルゴリズムを検討してきた。初期においては列車の遅延や運転頻度の低下など，利用者が不満を感じる部分を定義してその程度を定量化し，それら不満の総和が最小となる案をメタ解法の1つであるシミュレーテッド・アニーリング³⁾を用いて探索する方法を検討した⁴⁾。これは運休・運用変更まで考慮可能な手法であるが，評価値が十分良い解に到達する保証がないこと，解の収束にかなりの時間を要すること，利用者の不満を数値化する上での客観性の問題などの課題が残った。

これらの課題に対し，対象を列車順序変更計画に絞っ

* 信号・情報技術研究部 運転システム研究室
** 信号・情報技術研究部 運転システム研究室
(現 神奈川大学)

た上で、各利用者の目的地到着時刻の遅れの総和が最小となる計画案を、数理最適化⁵⁾により求める手法を検討した^{1) 6)}。数理最適化は、制約条件と呼ばれる、求めたい解（ここでは列車順序変更計画）が満たすべき条件を不等式の集まりとして定義し、制約条件を満たす中で、数式で定義された評価指標の指標値が最も良い解を求めるといった手法であり、国内外で本手法を運転整理案作成に適用する研究が行われている^{7) 8)}。

また別の手法として、制約プログラミング⁹⁾を新幹線の運転整理案作成に適用した事例もある¹⁰⁾。

以上に述べた先行研究によって、計算機により評価指標に対して最適な列車順序変更計画を作成することが可能になった。しかし、ここでの最適性とは定義された制約条件下での最適性に他ならず、同手法で求めた解が本来の意味で“良い列車順序変更計画”であるためには、実用上必要な制約条件が網羅されなければならない。そのためには、次の2つの問題を解決する必要がある。

一つは考慮可能な条件の限界に関する問題である。計算機が扱うデータを見ただけでは同列に見えるモノ（例えば駅や列車）であっても、指令員にとっては列車順序変更を行う上で考慮しなければならない差異が存在する。例えば、駅の設備や係員配置に伴う指令伝達時間の差、踏切遮断時間を考慮しなければならない区間、他社・他線区への影響を考慮しなければならない駅や列車等々であり、これらの情報を計算機に入力しメンテナンスすることや、事前にすべて洗い出してシステムを設計することは不可能である。

もう一つは考慮すべき事柄の定量化の問題である。複数の考慮すべき事柄のうち一方を優先すると他方に影響するような場合に、指令員は、どのような状況において、どの事柄をどの程度優先すべきなのかを感覚的に身に着けている。これらは、指令員が指導を受けたり経験したりする中で習得したノウハウ、つまり暗黙知であるため、指令員へのヒアリングによる明文化が難しく、定量的な制約条件として最適化手法に取り入れることができない。

2.3 課題に対する方向性

上記の課題に対し、本研究では図1に示す列車順序変更計画作成の枠組みを提案し、この枠組みに従った作成手法の確立を目指す。まず、指令員の思考プロセスのベースとなっている暗黙知に相当する定量的なルールが存在するものとする。そして、先行研究と同じ数理最適化の枠組みの中で、自明な制約条件だけでなく暗黙知に相当するルールを加えた制約条件の下で数理最適化を行う。これにより、本来の意味での“良い列車順序変更計画”の作成が可能になる。ここで、指令員の暗黙知に相当し数理最適化の制約条件となるルールのことを、運転整理ルールと呼ぶ。

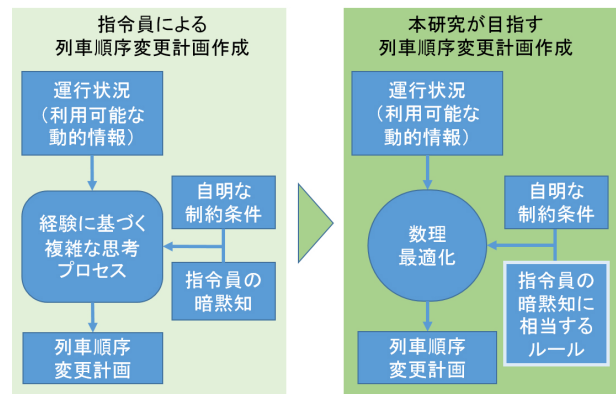


図1 本研究が目指す列車順序変更計画作成

3. 運転整理ルール

3.1 運転整理ルールの要件

運転整理ルールを求めることは、暗黙知を形式知に変えることに他ならない。ただし、指令員の暗黙知はシステム外の情報とそれらを用いるノウハウであるが、運転整理ルールは、数理最適化における制約条件として扱える様、次の要件を満たす必要がある。

- (1) システムで参照可能な静的および動的データにより構成される。
- (2) 変更後のダイヤが満たすべき条件（整理内容）と、同整理内容を適用する条件により構成される。

運転整理ルールは上記のように、整理内容とその適用条件によって構成され、「もし、現在のダイヤと今後の運行予定が一定の条件Xを満たす場合は、条件Yを満たすようダイヤを変更する」という形式のルールとなる。適用条件(X)の部分条件部、整理内容(Y)の部分帰結部と呼ぶ。

3.2 イベントダイアグラム

運転整理ルールのデータ表現に用いるイベントダイアグラムについて説明する。

条件部には整理前のダイヤの一部分が、帰結部には整理後のダイヤの一部分が満たすべき条件が表現される。どちらも、点の情報ではなく、ダイヤ上で広がりを持った部分を説明する必要があり、また、条件部が説明する部分と帰結部が説明する部分との位置関係を表現する必要もある。そこで、ダイヤ上でルールの対象となる部分を、列車の発着イベントを点（ノード）、イベント間の順序関係を先のイベントから後のイベントに向かう矢印（アーク）で表した、イベントダイアグラムの形状で表現する。着発イベントの順序関係には、同一車両のイベントの順序関係と、信号や進路制御に伴うイベントの順序関係がある。ここでは前者を車両順アーク、後者を制御順アークと呼ぶ。制御順アークは、駅の配線や連動条

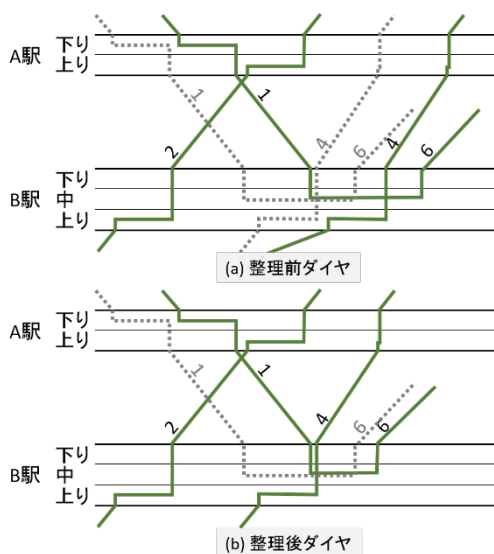


図2 運転整理（順序変更）の例

件によって変わる。

図2の運転整理の例は、下り1列車の遅延が、B駅で同時入線できないという理由により、上り4列車に影響する状況が予測されたため、B駅の両列車の到着順序を入れ替える順序変更を実施して、影響を回避する様子を示している。灰色点線が計画のダイヤ、緑色実線が予測のダイヤを表す。これに対する整理前のイベントダイアグラムと整理後のイベントダイアグラムの変化を図3に示す。実線矢印は車両順アーク、破線矢印は制御順アークを表す。ノードの色は遅延の有無を表す。図3の左右の整理前後のノード構成やアークの繋がり方（ネットワークの形状）の変化を見ると、1列車B駅着ノード(1.B.a)と4列車B駅着ノード(4.B.a)の間の制御順アークの向きだけが異なることが分かる。これによって1列車から4列車への遅延の伝播経路が絶たれ、その結果、4列車の遅延が解消されている。

3.3 イベントダイアグラムによるルールの構成

運転整理ルールは、

- (1) 整理前（条件部）のノード属性
- (2) 整理前（条件部）のイベントダイアグラムのアークの集合
- (3) 整理後（帰結部）のノード属性のうち、整理前から変更した部分
- (4) 整理後（帰結部）のイベントダイアグラムの中で整理前から変更したアークの集合

による構成とした。イベントダイアグラムの変化には、3通りのケースが考えられる。番線変更などの最も単純なケースでは、ノード属性の一部のみが変化する。順序変更や運用変更などのケースでは、図3の例のようにアークの構成（向きも含む）が変化する。臨時列車設定

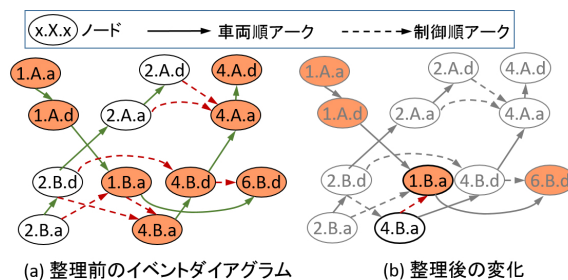


図3 イベントダイアグラム

表1 運転整理ルールのデータ構成の例

(1) 条件部ノード属性

ノード	線路	駅	番線	遅延
①	下り	B	中	
②	上り	B	上り	5分以上

(2) 条件部アーク構成

発ノード	着ノード	種別	遅延伝播
①	②	制御順	有り

(3) 帰結部ノード属性（変更箇所）

ノード	線路	駅	番線

(4) 帰結部アーク構成（変更箇所）

発ノード	着ノード	種別	追加削除
①	②	制御順	削除
②	①	制御順	追加

や運休の場合はアークの構成だけでなくノードの構成も変化する。上に示した構成により、必要最小限の情報量でこれらすべてのケースを表現可能とした。

図2の順序変更が実施される背後にある運転整理ルールとして、次のような例を考える。

<条件部> 下り列車xのB駅中線到着の遅延により、その直後の同駅上り線の列車yの到着が5分以上遅延する。

<帰結部> B駅において、列車y到着後、列車x到着に変更する。

上記の運転整理ルールのデータ構成を表1に示す。この例では、整理の内容を表す帰結部にはアークの変更箇所が示されており、これが順序変更に対応している。ノード属性の変更箇所は空欄となっているが、番線変更などを伴っていれば、ここに示される。

3.4 変更順序を有する運転整理ルールへの対応

一つの条件に対して、複数のダイヤ変更を同時（順不同）に実施する場合と、時間差を持って実施し、その順序にも意味を持つ場合がある。ダイヤ変更を順番に実施する場合には、その都度イベントダイアグラムのノード属性や形状が変化するの、それぞれの変更内容を、表1の(3)(4)に相当するデータ構成で表し、それらを時間順に並べた系列で全体の変更内容を表す。これにより順次実施するダイヤ変更にも対応でき、より汎用的な構成となる。

3.5 運転整理ルール抽出手法

3.5.1 相関ルール

2.3節では、運転整理に関して、指令員の暗黙知に相当する定量的なルールが存在すると仮定した。暗黙知には指令員による個人差やその時々で判断が揺れる部分が存在する。そこで、過去の複数の運転整理実績を分析することにより、相関ルール¹¹⁾として運転整理ルールを抽出する。一般的な相関ルールは、データベース $D = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ に対して、 $X \Rightarrow Y$ の形式で表現される。ここに s_i , X , Y は共にアイテムの集合であり、「あるアイテム集合 s_i が X を含むならば、 s_i は Y を含む」というルールを意味する。 X を条件部、 Y を帰結部という。

相関ルールは支持度と確信度の2種類の評価指標によってルールの有意性を示す。運転整理ルールに置き換えると、支持度は「事例全体の中で、適用条件 X を満たし、かつ、整理内容 Y が実施された事例の割合」を表し、確信度は「適用条件 X を満たす事例の中で、整理内容 Y が実施された事例の割合」を表す。

運転整理ルールでは、条件部と帰結部の間、および、帰結部の要素間に時間経過が存在する。したがって、分析対象のデータベース D の要素はアイテム集合の順列 $s_i = (t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{im_i})$ であり、条件部 X はアイテム集合、帰結部 Y はアイテム集合の順列となる。 s_i の形式のデータは系列データと呼ばれる。このように概念を拡張した相関ルールの発掘は系列ルールマイニング¹²⁾と呼ばれる。

3.5.2 分析対象データの収集

本研究では順序変更やそれに伴う番線変更といった局所の整理内容について、どのような条件の下でどのような整理が行われるかを相関ルールとして抽出したい。そこで、次の要件を満たす系列データ $s = (t_1, t_2, \dots, t_m)$ を分析対象データベースの要素（事例）とし、過去の実績から収集する。

- (1) 事前にルールを構成するイベントの数の上限 (N) を定め、列車ダイヤ全体のイベントダイアグラム上で連結関係にある N 個のイベントにより構成される。
- (2) 各アイテム集合 t_j は、対象となる N 個のイベントの、ある時刻におけるイベントダイアグラムを表し、そのすべてのノード属性およびアークから成る集合である。ただし、同時刻において、少なくとも1個以上の未実施のイベント（予測イベント）が含まれる。
- (3) アイテム集合 $t_1 \sim t_m$ の並びはイベントダイアグラムが変化する時系列を表す。さらに、 t_1 のイベントダイアグラムには少なくとも1個以上のイベントに遅延が発生し、 t_2 以降のイベントダイアグラムにダイヤ変更が含まれる。

3.5.3 運転整理ルールの抽出手順

(1) ネットワーク形状による系列データの分類

運転整理ルールは、条件部のイベントダイアグラムのネットワーク形状によって分類が可能である。そこで、 N 個のノードにより構成されるネットワークの形状 p を列挙し、系列データの初期のイベントダイアグラム t_1 の形状が p と一致するものを抽出した部分データベース D_p を生成する。これにより、分析対象となるデータの規模を縮小し、処理時間の短縮を図る。

(2) 頻出系列パターンマイニング

最終的に $r_1 \Rightarrow (r_2, r_3, \dots, r_k)$ 、(ただし r_i はアイテム集合) という形式のルールを抽出するため、まず頻出系列パターンを抽出する。系列データ $R = (r_1, r_2, \dots, r_k)$ と $s = (t_1, t_2, \dots, t_m)$ の間の二項関係 $R \sqsubset s$ を、

$$(r_1 \sqsubset t_1) \wedge (r_2 \sqsubset t_2) \wedge \dots \wedge (r_k \sqsubset t_{j_k}), j_k < j_{k+1}$$

により定義する。これは系列データの一般的な包含関係 $R \sqsubset s$ に、先頭のアイテム集合間の包含関係 $r_1 \sqsubset t_1$ の条件が加わった関係である。また、系列 R の支持度 $Supp(R)$ を、「 D_p の要素 $s = (t_1, t_2, \dots, t_m)$ のうち、 $R \sqsubset s$ を満たす要素 s の数」で定義する。このとき、 R の支持度 $Supp(R)$ が所与の最小支持度 $Supp_{min}$ 以上である系列データ R を頻出系列パターンとして抽出する。抽出には、系列パターンマイニングの手法である PrefixSpan¹³⁾ を応用した。PrefixSpan は一般的な包含関係 $R \sqsubset s$ に基づいて頻出系列パターンを抽出するアルゴリズムであり、長さ1の頻出系列から深さ優先探索により1アイテム系列を拡張していく。ここでは二項関係 $R \sqsubset s$ に基づいて抽出する必要があるが、それは、PrefixSpan において最初に長さ1の頻出系列を抽出する際、系列データの先頭のアイテム集合のみを走査するよう変更することで実現できる。

(3) 相関ルールの有意性判定

抽出された長さ2以上の頻出系列パターン $R = (r_1, r_2, \dots, r_k)$ に対応する相関ルール $r_1 \Rightarrow (r_2, \dots, r_k)$ について、その信頼度 $Conf(r_1 \Rightarrow (r_2, \dots, r_k)) = Supp(R) / Supp(r_1)$ が所与の最小信頼度 $Conf_{min}$ 以上である相関ルールを有意な相関ルールと判定し抽出する。

4. ルールを反映した列車順序変更計画の作成

抽出された運転整理ルールを反映した列車順序変更計画を提案する手法として、運転整理ルールと、数理最適化⁵⁾を用いた既存の運転整理案提案手法^{1) 6)}とを組み合わせた手法を開発した。開発した手法の流れを図4に示す。何も整理を行わない現在の予測ダイヤを列車順序変更計画の初期の整理案とする。整理案から生成したイベントダイアグラムを見て、運転整理ルールの条件部に当てはまる箇所があればその帰結部を当該箇所に適用することで新たに制約条件を追加する。次に、制約条件の

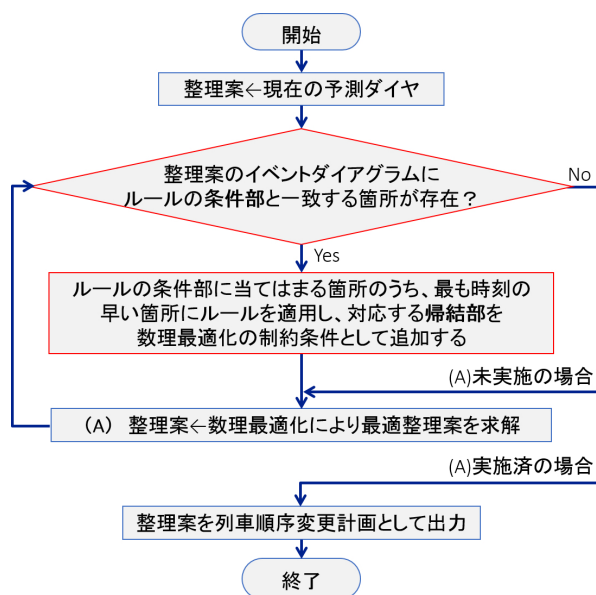


図4 開発した列車順序変更計画作成の流れ

下で既存手法の数理最適化により最適運転整理案を求める。再びルールに当てはまる箇所の探索に戻り、ルールの適用と数理最適化による最適整理案の求解を、運転整理ルールの条件部に当てはまる箇所がなくなるまで繰り返す。運転整理ルールの適用では、1回の繰り返しにつき、運転整理ルールの条件部に当てはまる箇所のうち最も時刻の早い箇所のみを対象とし、対象箇所が帰結部を満たすという内容の制約条件を追加する。この処理とその後の数理最適化により整理案が変化する。1回の繰り返しにつき1箇所のみ運転整理ルールを適用するのは、元の整理案では運転整理ルールの条件部に当てはまっていた箇所が、新たな整理案では当てはまらなくなる可能性があるからである。時刻の手前側から順に運転整理ルールを適用することで、繰り返し処理を収束させる。

5. 検証

5.1 運転整理ルール抽出試験

単線区間を含む実在の線区において過去に実施された3件の運転整理事例に含まれる90回の計画変更を対象に、運転整理ルールの抽出を行った。有意性評価基準を、最小支持度=3、最小確信度=1.0に設定し、ルールを構成するイベント数の上限がN=3のケースとN=4のケースについて実施した。その結果、N=3では約1分30秒の計算時間を要し31個のルールが抽出された。一方、N=4では約54分の計算時間を要し170個のルールが抽出された。計算には一般的な性能のPC (CPU: 64bit 7Core, OS: Windows10)を使用した。N=3のケースで抽出された31個のルールの内容を分析したところ、イベントダイアグラム形状の異なる同義なルールが含ま

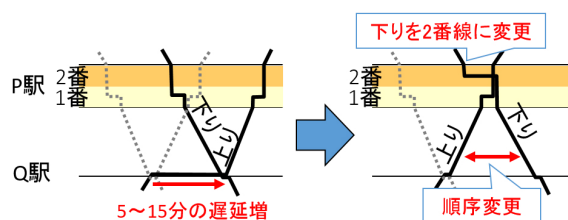


図5 ルール1の運転整理内容

れており、実質的には15個のルールであることが分かった。これは、イベントダイアグラムの中にルールに関与しないイベントが含まれることが原因であり、そのようなイベントを排除することで冗長性を回避可能である。N=4のケースでも、同様の理由により見かけのルールの数が増加したものであり、実質的なルールの数は少ないものと思われる。

抽出されたルールの中から、次に示す2つのルールを列車順序変更計画の試験用ルールに選定した。

(ルール1)

- 条件部：i) (単線区間) P駅～Q駅間の駅間使用順序が、下り列車a→上り列車bであり、
ii) 列車bのQ駅着から発の間の遅延増が5分以上15分未満である。

- 帰結部：i) P駅～Q駅間の駅間使用順序を、上り列車b→下り列車aとし、
ii) 列車aのP駅着番線を2番線とする。

(ルール2)

- 条件部：i) H駅～I駅間の駅間使用順序が、下り列車a→上り列車b→上り列車cであり、
ii) 列車b、列車cどちらも、I駅着から発の間の遅延増が5分以上15分未満である。

- 帰結部：i) H駅～I駅間の駅間使用順序を、列車b→列車c→列車aとする。

ルール1は、順序変更の際、単線の行き違い駅となるP駅の番線競合を回避するため下り列車の番線を変更する例である(図5)。ルール2は単線区間の列車の駅間使用順序を2本後ろに下げる特殊な整理のケースである。

5.2 列車順序変更計画作成試験

ルール1が適用されるケースを確認するため、P駅より上り方において特定の下り列車が7分および8分遅延する2つの仮想的なケースについて、従来の数理最適化手法とルール1を組み込んだ開発手法で整理案を作成し、それらを比較した。ここでの数理最適化の評価指標には、総遅延時分(最小化)を用いた。その結果、いずれのケース、いずれの手法においても、P駅～Q駅間で上り列車を先行させる順序変更案が出力されたが、それに伴う番線変更に手法による違いが現れた。開発手法では、ルール1に従い常に下り列車の番線が変更されたが、

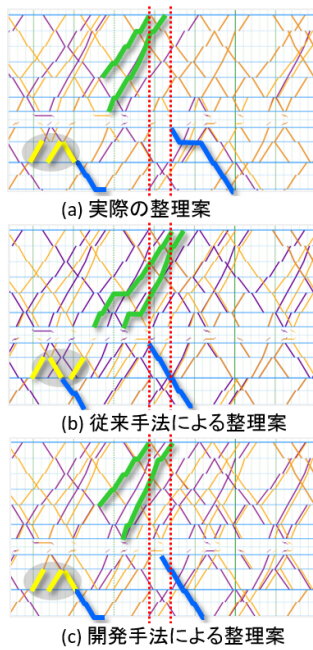


図6 整理案の比較

従来手法では、7分遅延したケースにおいて上り列車の番線が変更される案が確認された。ルール1は過去の事例に3回以上出現し、すべて適用された実績があることから、それに反する従来手法の整理案は、実際の場面において許容されない可能性もある。

ルール2の適用試験では、ルール抽出に用いた3事例の一つと同じダイヤの乱れに対し、従来手法と開発手法により整理案

を作成した。評価指標はルール1のときと同じである。

図6に、(a) 指令員による実際の整理案、(b) 従来手法による整理案、(c) 開発手法による整理案を示す。橙色の列車線が整理案を示しているが、比較のため対応する上下線2本ずつの列車に色を付した。また、(c)の中でルール2の順序変更が適用された箇所を黄色で示した。赤点線の時刻上で比較すると、実際の整理案は従来手法に比べて、上り列車(緑)の遅延回復が早く、逆に下り列車(青)の遅延回復が遅いことが分かる。これは上り列車を優先する整理が行われたためであり、開発手法の整理案にも同様の傾向が見られた。一方、評価指標である総遅延時分の観点では(b)が最も良い整理案であった。運転整理ルールの導入により、全体的な指標の向上よりも特定の列車を優先するような整理を提案できる可能性があり、この実験では、そのような例を確認することができた。

6. おわりに

列車順序変更計画の作成支援における課題であった、指令員の知見やノウハウを提案手法に反映する方法として、それらの形式知である運転整理ルールの抽出手法と運転整理ルールを反映した列車順序計画作成手法の開発の概要と、それらの基礎的な実験の結果について述べた。

運転整理ルールの抽出実験では、冗長なルールが多数生成されるなどの問題が新たに見つかり、現在その対策を検討しているところである。また、今回は関連ルール抽出に使用した運転整理事例が少ないため、今回抽出されたルールの信頼性については事例を増やして再検討す

る必要があり、大量データに対する性能評価も含め、今後検討を深める予定である。

列車順序変更計画作成試験では、ルールを反映することで駅や線区に固有の事情を考慮できる可能性を確認した。実用化に際しては、抽出ルールから動的に制約条件を生成するインターフェースについて検討が必要である。

文献

- 1) 佐藤圭介, 平井力: 旅客視点の指標に基づくダイヤ乱れ時の列車順序・間隔整理手法, 鉄道総研報告, Vol.30, No.8, pp.11-16, 2016
- 2) 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専門委員会(編): 鉄道ダイヤ回復の技術, オーム社, pp.16-17, 2010
- 3) 柳浦睦憲, 茨木俊秀: 組合せ最適化メタ戦略を中心として, 朝倉書店, 2000
- 4) 富井規雄, 田代義昭, 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.SIG-2(TOM11), pp.26-38, 2005
- 5) 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, 2009
- 6) Sato, K., Tamura, K., Tomii, N., "A MIP-based timetable rescheduling formulation and algorithm minimizing further inconvenience to passengers," *Journal of Rail Transport Planning & Management*, Vol.3, pp. 38-53, 2013.
- 7) 今田京介, 富井規雄: 途中折り返し運転を考慮した混合整数計画法による運転整理アルゴリズム, 電気学会論文誌D, Vol.137, No.6, pp.484-491, 2017
- 8) Dollevoet, T., Huisman, D., Schmidt, M., Schöbel, A., Delay management with rerouting of passengers, *Transportation Science*, Vol.46, No.1, pp.74-89, 2012.
- 9) 淵一博(監修), 溝口文雄他(編): 制約論理プログラミング, 共立出版, 1989
- 10) 清水宏之, 野末尚次: 新しい計画技術と鉄道運行管理 - 制約プログラミングを用いた新幹線運転整理システム -, 電気学会産業応用部門大会講演論文集報告書作成学会論文集, No.S7-4, pp.831-836, 2002
- 11) 喜連川優: データマイニングにおける関連ルール抽出技法, 人工知能学会誌, Vol.12, No.4, pp.513-520, 1997
- 12) Kour, A., "Sequential Rule Mining, Methods and Techniques: A Review," *International Journal of Computational Intelligence Research*, Vol.13, No.7, pp.1709-1715, 2017.
- 13) Sharma, P., Balakrishna, G., "PrefixSpan: Mining sequential patterns by prefix-projected pattern," *International Journal of Computer Science & Engineering Survey*, Vol.2, No.4, pp.111-122, 2011.