

列車遅延時における運転取扱者支援のための 駅構内入換計画の変更手法

加藤 怜* 田中 峻一* 坂口 隆*

Station Shunting Rescheduling Algorithm for Supporting Dispatchers Under Train Traffic Disruption

Satoshi KATO Shunichi TANAKA Takashi SAKAGUCHI

When trains are delayed, a station shunting dispatcher must modify its shunting schedule according to the train control room about the train rescheduling plan. However, it is difficult to produce a modified schedule quickly because the dispatcher has to consider the track layout and the complicated interference of train routes. Therefore, we develop a shunting rescheduling algorithm for supporting dispatchers. The algorithm uses the predicted diagram, in addition to the patterns of arrival/departure tracks and shunting routes, which are predetermined in advance. The results of the application to the real shunting schedule confirm that the algorithm produces a rescheduling plan in a short time with good quality.

キーワード：運転整理，構内入換計画，予測ダイヤ，変更パターン，PERT

1. はじめに

CTC (Centralized Traffic Control) の普及により，駅の信号制御は指令室での一括制御が一般的になった。しかし，構内配線や進路構成が複雑な駅では，現在も信号扱所において信号制御が実施されている場合がある（このような駅を「運転取扱駅」という）。運転取扱駅では，ダイヤ乱れにより本線列車の運休，車両運用変更等が生じた場合，信号扱所の担当者（以下，「運転取扱者」という）が必要に応じて駅構内入換計画を変更する。駅構内入換計画の変更は，構内配線，進路の支障関係を把握している必要があるだけでなく，車両運用や駅作業を考慮しなければならないため，高い技量と豊富な知識が必要になる。そのため，経験が浅い担当者でも的確かつ迅速な変更内容の立案を可能とする支援装置の開発が求められている。

そこで本稿では，ダイヤ乱れ時における運転取扱者の支援を目的とした，駅構内入換計画の変更手法を提案する。提案手法は，ダイヤ乱れ時に指令から受領する情報を入力とし，構内入換の予測ダイヤおよび事前に定義する着発番線決定パターン，入換経路決定パターンを活用することで，駅構内入換計画の変更内容を迅速に計算する。そのうえで，提案手法の実用性を確認するため，実際の駅構内入換計画を対象にその性能を検証する。

2. ダイヤ乱れ時の駅構内入換計画の変更

2.1 駅構内入換計画の変更の現状

駅構内入換計画は，当該駅の本線列車の着発や留置な

どの各番線の使用計画，各番線間の入換計画，分割併合や清掃などの作業計画を定めている。ダイヤ乱れ時には，指令から本線列車の運休，車両運用変更，順序変更，番線変更等の変更内容を示した手配書を受領し，その内容にもとづき，必要に応じて駅構内入換計画を変更する。そこでは，入換経路や電留線の使用順序を本線列車の運行への影響を最小限にするように変更することが求められる¹⁾。

図1に，所定の駅構内入換計画およびダイヤ乱れ時の変更後の例を示す。この例は，列車1Mの遅延により1M，4Mの当該駅より下り方が区間運休となり，臨時折返しの手配を受領した際の変更案を示しており，1Mから電留線に引き上げ，4Mとして運用する計画を示している。

構内入換計画の変更業務における運転取扱者の支援を検討するため，担当者へのヒアリング調査を実施し，ダイヤ乱れ時の業務フローを図2のように整理した。駅の信号扱所は，「輸送担当」と「信号担当」の2つに分かれており，それぞれで業務を分担している。輸送担当では，指令から到着列車，出発列車の順序の情報や，本線列車の運転整理内容を記した手配書を受領する。その後，列車順序を「到着列車の順序表」として信号担当に伝える。また，構内入換計画を変更する場合は，変更内容を検討するとともに，その内容を記載した手配書を作成し，信号担当に渡している。このとき，必要に応じて指令や乗務員基地，車両基地とも打合せを行う。

一方，信号担当では，輸送担当から到着列車の順序表を受領し，信号制御盤にて列車の到着や出発，駅構内の進路構成を逐次確認する。また，確認した列車については，当日の実施ダイヤに遅延情報を含めて記入する（こ

* 信号・情報技術研究部 運転システム研究室

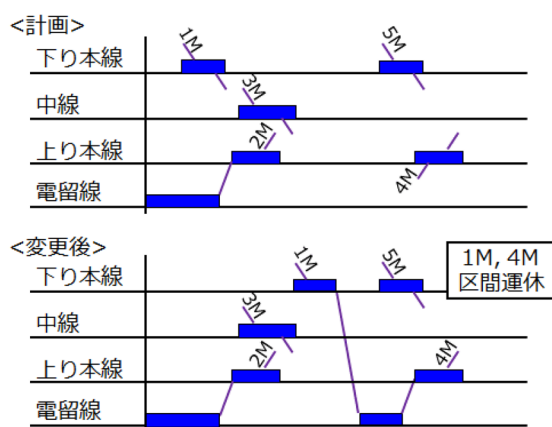


図1 駅構内入換計画の変更の例

の記入済みダイヤを「確認用ダイヤ」と呼ぶ)。また、構内入換計画を変更する場合は、輸送担当から手配書を受領し、確認用ダイヤに記入したうえで、その内容をPRC (Programmed Route Control) に入力する。

本稿では、ダイヤ乱れ時における計画変更に着目する。ひとたびダイヤが乱れると、状況の変化に伴って本線列車の計画が何度も変更されるため、指令からの手配書を五月雨式に受領することになる。そのたびに構内入換計画変更の必要性が生じるため、担当者の大きな負担となっている。そこで、支援の対象を、輸送担当の手配書作成の部分とする。システムによりこの部分に対する支援ができれば、担当者の負担が大きく軽減できるとともに、統一かつ迅速な手配が可能になると考えられる。

2.2 構内入換計画変更の制約条件と評価指標

ダイヤ乱れ時における構内入換計画の変更においては、以下のような項目を考慮する必要がある。

- ① 指令から受領する列車順序、運休や車両運用変更等の本線の変更内容を満たすこと (ただし、番線については駅でも変更可能)
- ② 列車の到着から出発までの時間、入換に要する時間が必要時間を満たすこと
- ③ 入換は、進路構成が可能な進路をとること
- ④ 列車と列車 (入換を含む) の間には必要な時隔を確保すること
- ⑤ 各列車は計画時刻より早く出発しないこと
- ⑥ 各番線の線路容量を満たすこと (1つの番線を複数の編成が占有しないこと)
- ⑦ 分割併合等の駅作業を実施する場合は必要な作業時間を確保すること
- ⑧ 折返しで運転台が変更になる場合には、整備や移動のための時間を確保すること

また、評価指標については、遅延量、変更量、駅作業量など、様々な項目が考えられる。しかし、各項目間に

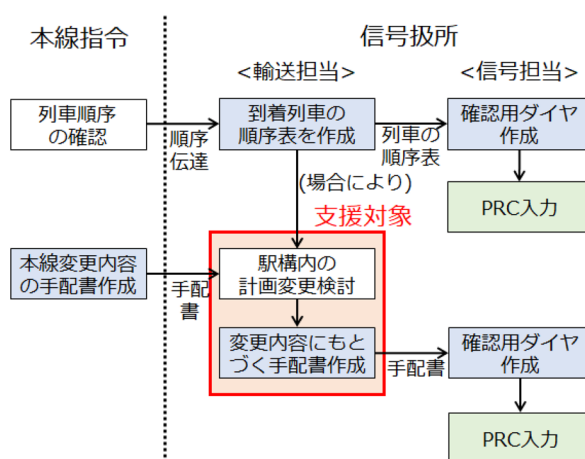


図2 運転取扱駅のダイヤ乱れ時の業務フロー

はある程度の相関性があると考えられる。また、評価指標が増加するほど計算が複雑化する、提案内容が曖昧になるといった問題が生じるため、最小限の評価指標とすることが望ましい。以上を踏まえ、下記2点を評価指標として設定する。

- ① 本線列車の出発増遅延 (停車時分を計画より短くすることでより遅延を回復した場合は0とみなす)
- ② 所定の計画からの変更回数

2.3 関連する従来研究

関連する従来の研究については、国内でもわずかながら事例がある。たとえば、佐藤ら²⁾、Sugi et al.³⁾などが挙げられるが、いずれも本線の列車遅延や順序変更の際の変更が対象であり、運休や車両運用変更といった本線の変更が生じた場合を想定していない。

また、海外では駅の着発線が総じて多いことから (特に終端駅)、どの番線に到着するかといった着発番線の変更にて特化した研究が多く (たとえば Demange et al.⁴⁾、Freling et al.⁵⁾ など)、入換経路の変更までは明示的に対象とはしていない。よって本研究での変更対象とは必ずしも一致せず、そのまま活用することが難しい。

3. 構内入換計画変更アルゴリズム

3.1 本研究のアプローチと全体の流れ

ダイヤ乱れ時の構内入換計画の変更は、指令から変更後の車両運用を指定されており、一方で平面交差支障など複雑な条件を考慮する必要があることから、可能な選択肢が少なく、制約条件が多い問題と捉えられる。このような問題に対しては、「パターン活用」のアプローチが有効と考えられる。これは、この条件を満たしたときにこういう変更をするといった「パターン」を事前に準備しておき、パターンにもとづいて変更するという概念

の手法である。この手法は解の最適性を保証しない近似解法に位置付けられるが、計算の迅速さ、変更内容の理解の容易さ、他駅への展開などの点でメリットがある。

構内入換計画の変更においては、本線列車の方向別着発順序を所与として計算を行うことと、本線列車の制約が厳しいことを踏まえる必要がある。そこで、本稿ではパターン定義の煩雑性を回避するために、着発番線を決するパターンと入換経路を決するパターンの2つのパターンに段階を分けて適用する方法を構築した。

アルゴリズムの全体の流れを以下に示す。

Step1：指令から受領する手配の内容を入力し、現在の運行状況と手配内容から何も変更しない場合の構内入換の予測ダイヤを作成する。

Step2：予測ダイヤをもとに、変更が必要な仕業を抽出し、事前に定義する着発番線決定パターンリストを参照し、評価値のよい着発番線を選択する。

Step3：Step2で着発番線を決した仕業について、事前に定義する入換経路決定パターンリストを参照し、評価値のよい入換経路を選択する。

各処理について、次節以降で詳細を述べる。指令から受領する手配については、列車の運休、車両運用変更（分割併合作業の変更を含む）、時刻変更（順序変更を含む）、番線変更の4種類を想定し、これらの本線の計画変更に対応可能なアルゴリズムを構築する。

3.2 構内入換の予測ダイヤ作成手法

3.2.1 前提条件と適用手法

予測ダイヤ作成にあたり、以下の前提条件を置く。

- ・基本の構内入換計画が所与
- ・構内の各番線について、各仕業の占有順序が所与
- ・方面ごとに、(変更後の)列車の到着および出発順序、到着見込み時刻および出発予定時刻が所与

作成手法としては、PERT (Program Evaluation and Review Technique)⁶⁾を適用する。この方法は列車運行のモデル化手法として汎用性が高く、本線の運転整理でも適用例がある(たとえば、富井ら⁷⁾)。

3.2.2 ネットワークによるモデル化

PERTを適用するために、構内入換計画をネットワークによりモデル化する。ネットワークはノード(点)およびノード間を結ぶアーク(矢印)で構成する。例として、図1の変更後に対応するネットワークを図3に示す。このネットワークにおいて、ノードは以下のいずれかを意味する。

- ・本線列車の到着および出発(ノード1, 3, 4~6, 8, 10)
 - ・入換開始および終了(ノード2, 7, 9, 11~14)
 - ・ダミーの始点ノード(ノード5)
- アークは6種類を設ける。以下、詳細を示す。

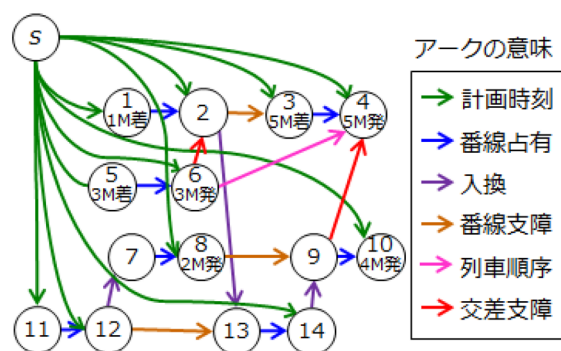


図3 予測ダイヤ作成のためのネットワーク

(1) 計画時刻アーク

列車の到着や出発、また入換の開始が所与の計画時刻以降となるようにするためのアークである。始点ノードから、列車の到着・出発を示すノード、入換の開始を示すノードに向けて張る。アークの重み(そのアークの通過時のコスト)は、計画の時刻を時間換算した数値とする。

(2) 番線占有アーク

ある編成が番線を占有していることを意味するアークである。本線列車の到着あるいは入換の終了を表すノードから、本線列車の出発あるいは入換の開始を示すアークに張られる。重みは最小占有時分とする。

(3) 入換アーク

入換を示すアークである。入換1つに対し1本張られる。重みはその入換に必要な時分とする。

(4) 番線支障アーク

各番線のある占有と次の占有に一定の時間を設けることを意味するアークである。占有の終了を示すノードから次の占有の開始を示すノードに向けて張られる。重みはその番線の発着時隔とする。

(5) 列車順序アーク

方向別に、出発順序を順守するようにするためのアークである。連続する2つの列車の出発番線が異なる場合のみ張られる(同一番線の場合、占有の順序で順序が保証される)。重みは0とする。

(6) 交差支障アーク

交差支障関係にある入換について、一定の時間間隔をあけることを意味するアークである。入換の終了を示すノードから、それと支障する入換の開始を表すアークに向けて張られる。重みは交差支障時隔とする。このアークは入換の順序に従う向きに張られるが、入換の順序の決定方法については後述する。

3.2.3 計算の手順

以上で構成するネットワーク上で、PERTにもとづきクリティカル・パスを計算することにより、各ノードの発生時刻、すなわち列車の到着・出発、入換の開始・終

了の予測時刻を計算する。具体的には、番線占有の早い順に（ネットワークの左側から）、各ノードの発生時刻として式(1)により計算する。

$$t_n = \max_{m \in A_n} \{t_m + e_{m,n}\} \quad (1)$$

式(1)の各記号の意味は以下の通りである。

t_n ：ノード n の発生時刻

A_n ：ノード n に張られるアークの元ノードの集合

$e_{m,n}$ ：ノード m から n に張られたアークの重み

すなわち、各ノードの発生時刻は、そのノードに向けて張られているアークの元ノードの発生時刻にアークの重みを加えた時刻のなかで、最も遅い時刻となる。

この計算にあたり問題となるのが、平面交差支障の扱いである。クリティカル・パスの計算では、あらかじめ対象のネットワークが定まっているのが前提である。しかし、交差支障関係にある入換の実行順序を事前に決めることができない（列車が遅延している状況下では、たとえ占有順序が決まっても、入換順序は確定しない）。よって、交差支障アークの向きを事前に確定させることができない。さらには、交差支障関係にある入換の組合せは非常に多く、交差支障アークだけで膨大なネットワークとなり、長大な計算時間を要するおそれがある。

そこで、計算を進めながら必要最小限の交差支障アークを追加する手法を構築する。図4に計算処理フローを示す。まず、各番線の占有順序から、交差支障アーク以外を含むネットワークを作成する。続いて、クリティカル・パスの計算を進める過程で、もし入換終了に相当するノードの発生時刻を計算した場合には、その入換と交差支障関係にある他の入換のなかで、最も占有順序の早い入換の開始ノードに向けて交差支障アークを張る。この処理により、アークの向きを確定したうえで、必要最小限のアークを張るように制御することが可能となる。

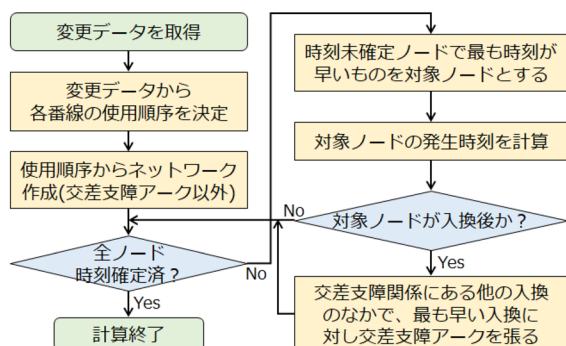


図4 交差支障を考慮した計算処理フロー

3.3 パターンに基づく変更アルゴリズム

3.2節で述べた予測ダイヤのネットワークを変更することで、構内入換計画の変更内容を提案する。基本的な

手順は、前処理、着発番線決定パターンの適用、入換経路決定パターンの適用の3段階で構成される⁸⁾。

3.3.1 前処理

本線の運行情報および入力後の各仕業の情報から、以下の条件にあてはまる仕業を構内入換計画の変更が必要な仕業として抽出する。

- ① 新たに分割・併合作業が発生した仕業
- ② 新たに着運用未定、発運用未定となった仕業
- ③ 着発の列車の組合せが変更となった仕業
- ④ 到着順序または出発順序が変更となった仕業（相対的に順序が下がった仕業）

これらの仕業に対し、入換のアークを削除し、分割・併合に関するグラフの更新を行ったうえで、着発順序を縛るアークや出発から到着の関係を持つノード間を結ぶアークを追加する。運休に伴う不要なノードやアークは削除する。

3.3.2 着発番線決定パターンの適用

変更が必要な仕業に対し、駅の到着時刻が早い仕業の順に、あらかじめ準備する「着発番線決定パターンリスト」を参照し、着発番線を決定する。表1に着発番線決定パターンリストの例を示す。本線列車の到着線路（線区・方向）および出発線路（線区・方向）を含んだ組合せ（他の条件も必要に応じて追加する）や分割・併合等の作業の有無といった条件に対し、候補となる到着番線、出発番線および入換の有無をパターンとして複数登録する。また、各パターンについて、優先順位に応じて選択したときのペナルティ（単位は秒）を設定しておく。処理手順を以下に示す。

Step1：3.3.1項で抽出した全ての仕業を運休と仮定した時の予測ダイヤ（以下、「仮の予測ダイヤ」と呼ぶ）を計算する。

Step2：3.3.1項で抽出した仕業のうち構内到着順序が最も早い仕業に対し、最も優先順位の高い着発番線の組合せ候補を選択し、ネットワークを更新する（入換経路未定として着発順序を縛るアークを設定する）。ただし、着発番線の使用順序に矛盾が生じる場合は、次に構内到着順序が早い仕業を対象としてネットワークの更新を実施する。

Step3：Step2のネットワークに対して予測ダイヤを計算する。

Step4：Step1およびStep3の各列車の出発時刻の差分の合計（「発遅延」とする）を計算する。

Step5：発遅延が一定時分以上であれば、着発番線決定パターンリストの次点の候補を選択し、Step2～Step4を行う。ただし、着発番線決定パターンリストの第2候補以降はペナルティ値を発遅延に加算する。

Step6：Step2～Step5を繰り返し、発遅延が一定時分以上以内に収まればその候補を採用し、すべての候補を

表1 着発番線決定パターンリストの例

項目	属性
変更後到着線路 (線区・方向)	線区 A・下り
変更後出発線路 (線区・方向)	線区 A・上り
変更前着発番線 (到着, 出発)	3 番線, 3 番線
分割併合の有無	なし
着～発が同一の列車か否か	NO
変更番線候補 (優先順位, 到着番線, 出発番線, 入換の有無, ペナルティ)	(1, #3, #2, 有, 0) (1, #2, #2, 無, 10) ...

表2 入換経路決定パターンリストの例

項目	属性
到着番線	2 番線
出発番線	1 番線
利用経路番線	2 番線 → 電留 1 番線 → 1 番線
入換最小時分	300 秒

実施した時点で一定時分以内に収まる候補がなければ、発遅延が最小の候補を採用する。

Step7: 定した着発番線に従って仮の予測ダイヤを更新し、3.3.1 項で抽出した仕業における次に構内到着順序が早い仕業に対し、Step2～Step6 を繰り返すことで、すべての仕業に対する着発番線を決定する。

3.3.3 入換経路決定パターンの適用

続いて、3.3.2 項で入換が必要と決まった仕業について入換経路を決定する。ここで、表2 に示す「入換経路決定パターンリスト」を参照する。到着番線および出発番線の組合せに対し、経路番線のパターンを複数登録し、またその優先順位およびその経路で必要な入換最小時分を設定しておく。処理手順を以下に示す。

Step1: 着発番線が決定した時点のネットワークに対し、予測ダイヤ計算を行い、その時刻に従って計画時刻アークの重みを更新する。

Step2: 入換経路が未決定の仕業のうち、構内到着時刻を表す計画時刻アークの重みが最も小さい仕業に対し、3.3.2 項で採用した着発番線と入換経路決定パターンリストからとりうる入換経路を取得し、着発時刻と経路番線の関係から矛盾が生じない入換経路に対し、それぞれの入換となった時の予測ダイヤを計算する。

Step3: Step1 および Step2 の各列車の出発時刻の差分の合計（「発遅延」とする）を計算し、一定時分以内の候補があれば、発遅延が最小のものを採用する。

Step4: Step3 において採用される候補がなければ、以下のいずれかの条件で、他の仕業の入換経路の変更

表3 計算結果

	出発遅延時分(s)	変更仕業数	計算時間(s)
ケース 1	0	0	0.76
ケース 2	0	2	0.38

候補を探索し、発遅延が一定時分以内の候補を採用する。ただし、他の仕業の変更回数には規定数を設け、規定数を超過する場合は最小の発遅延の条件を採用する。

a) Step2 で矛盾が生じた候補に対し、矛盾が生じた原因となった他の仕業の入換経路を入換経路決定パターンリストに従って変更する。

b) Step3 の PERT 計算において、対象としている仕業の入換に関わるノードとクリティカル・パスで接続されているノードを含む仕業に対し、入換経路を入換経路パターンに従って変更する。

Step5: もし条件を満たす入換経路が存在しない場合は、3.3.2 項に戻り着発番線の変更を実施する。

Step6: 確定した入換経路に応じて予測ダイヤを計算し、計画時刻アークの更新を行い、次の入換経路が未決定の仕業に対し Step2～Step4 を繰り返すことにより、すべての仕業の入換経路を決定する。

4. 実在の駅構内入換計画を用いた検証

4.1 対象とする駅および構内入換計画

開発手法の性能を検証するため、実際の駅を対象としたケーススタディを行う。対象とする駅は、電留線 6 本を含む番線が 11 個あり、1 日の列車本数が約 350 本、入換本数が約 280 本の規模の駅である。この駅を対象に、以下の 2 つのケースに対しアルゴリズムを適用し、性能を確認する。

- ・ ケース 1: ある列車の到着時刻が 10 分遅延、別の列車の到着時刻が 25 分遅延 (順序変更あり)
- ・ ケース 2: 2 列車の運休 (部分運休が 2 本)、それに伴う車両運用変更が 2 仕業

4.2 検証結果

検証結果を表3 に示す。各ケースの結果として、本線列車の出発増遅延時分、所定の計画からの変更回数 (変更のあった仕業数)、計算に要する時間を示している。

ケース 1 では、いずれも指定した出発時刻からの遅延 (構内入換変更を起因とする出発遅延) は生じなかった。また、計画から変更となった仕業はなかった。ケース 2 では、運休が含まれる仕業以外に変更は生じなかった。提案アルゴリズムでは、変更が必要な箇所以外はなるべく変更をしないようにしているため、それが作用した結果といえる。計算時間については、いずれのケースも 1

秒未満であり、非常に高速に提案がなされている。

図5、図6に、ケース2の提案結果を示す。図5は所定の構内入換計画だが、127M および 134M が部分運休となり、臨時折返しを実施するケースを想定している。このとき、事前定義のパターンとして、ホーム折返しを優先するパターンを登録したときの結果が図6である。また、別途電留3番線への引き上げを優先するパターンを登録したときの結果が図7である。図7の提案も1秒未満で実現しており（ただし、134M の出発が所定時刻より遅延している）、事前定義のパターンに従った提案を短時間で可能であることを確認した。

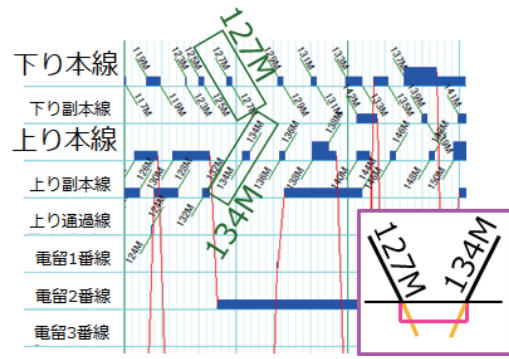


図5 ケース2の所定の構内入換計画

5. まとめ

本稿では、ダイヤ乱れ時における駅構内入換計画の変更手法を紹介した。本手法は、PERTにもとづき構内入換計画の予測ダイヤを計算し、事前定義のパターンを参照し逐次計算することで、短時間での提案を可能としている。また、構内入換計画は駅ごとで線形や制約が大きく異なり一般化が困難であるが、本手法では事前に定義したパターンを用いるため、理解が容易で、かつ様々な駅へも適用できると考えている。

さらに、実際の構内入換計画を対象としたケーススタディにより、本手法では構内入換変更起因する出発遅延が生じない案を1秒未満で提案可能であることを確認した。今後は、様々な線区や駅を対象に検証を重ねることで、支援システムとしての実用化を目指したい。

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，2010
- 2) 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，Vol.127，No.2，pp.274-283，2007
- 3) Sugi, M., Nagai, H., Yamamoto, M., Shiomi, Y., Ota, J., “Rescheduling of train shunting in railway stations,” International Journal of Automation Technology, Vol.4, No.6, 2010.
- 4) Demange, M., Stefano, G. D., Leroy-Beaulieu, B., “On the online track assignment problem,” Discrete Applied Mathematics, Vol.160, pp.1072-1093, 2012.
- 5) Freling, R., Lentink, R. M., Kroon, L. G., Huisman, D., “Shunting of passenger train units in a railway station,”

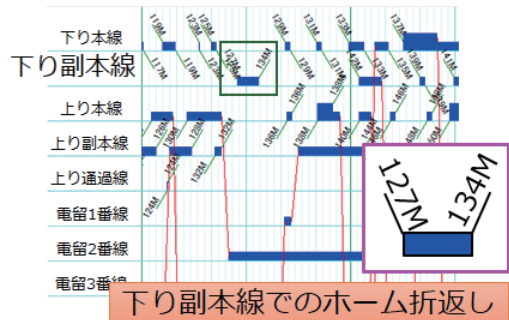


図6 ホーム折返しを優先した場合の変更案

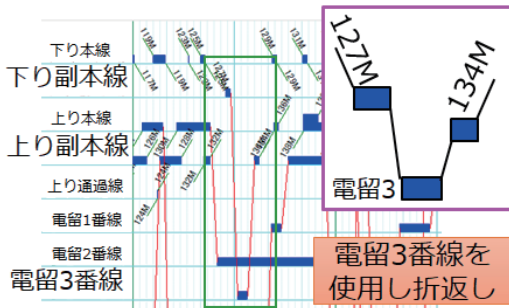


図7 電留線引き上げを優先した場合の変更案

Transportation Science, Vol.39, No.2, pp.261-272, 2005.

- 6) 関根智明：PERT・CPM，ORライブラリー11，日科技連，1973
- 7) 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
- 8) 加藤藤，田中峻一：ダイヤ乱れ時における予測ダイヤとパターンに基づく構内入換計画変更手法，J-Rail2020，2020