

乱れたダイヤの早期回復を支援する



加藤 怜

Satoshi Kato

信号技術研究部
運転システム研究室
主任研究員

はじめに

事故や災害などのさまざまな事象により、列車ダイヤが乱れることがあります。その場合には、**指令員**が、あらかじめ決まっている列車ダイヤの一部を変更することで、乱れたダイヤを回復する業務を実施します。この業務のことを「運転整理」とよび、列車の運休や、**車両運用**の変更、駅での到着・出発番線の変更などの方法があります。ダイヤ乱れ時には、指令室には数多くの情報が飛び交い、非常に慌ただしい雰囲気となります(図1)。そのようななかで、指令員はダイヤの早期回復を試みますが、これまでの運転整理に関するノウハウや迅速な判断を行うためのスキルが求められるため、非常に難しい業務といえます。

そこで、近年急速に進展が進む情報通信技術を活用して、指令員の運転整理業務の支援、ひ

指令員

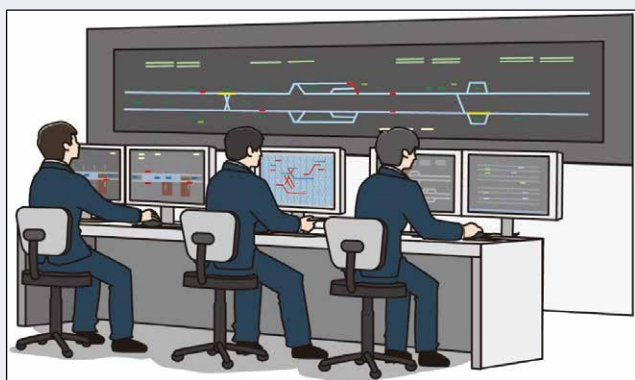
列車の運行は、「指令室」とよばれる箇所ですべてに管理されています。指令室で列車の運行状況を把握して乗務員や駅員に指示を与える担当者を指令員とよびます。指令員は、もし列車が遅延した場合には変更手配や駅や乗務員などの現業機関に対し指示をするなどして、ダイヤを回復させる運転整理業務も担当しています。

車両運用

列車をダイヤどおりに運行するために、どの車両をどの列車・区間で使用するかを定めたスケジュールのことを車両運用とよびます。ダイヤ改正の際に、平日・休日ごとに基本となる運用が作成され、これに臨時・季節列車の運転にともなう変更や、駅・線路工事にともなう変更が加えられます。

図1 通常時の指令室(左)とダイヤ乱れ時の指令室(右)

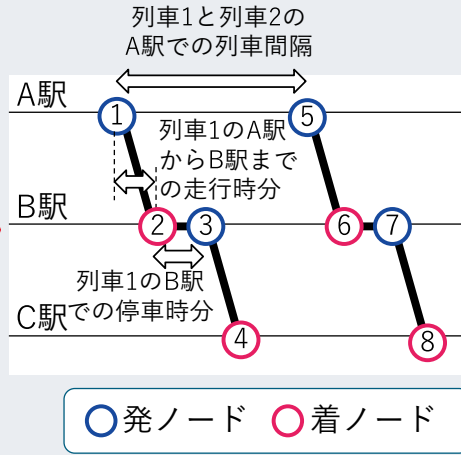
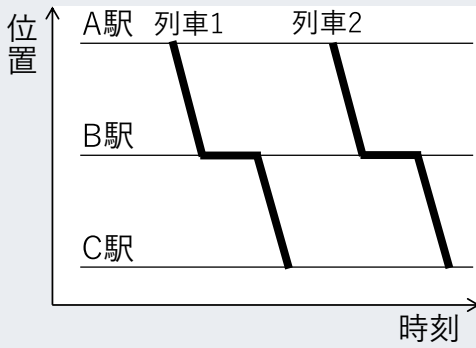
通常時の指令室



ダイヤ乱れ時の指令室

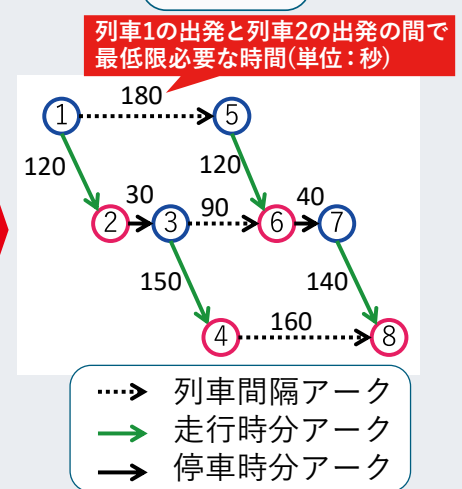


列車ダイヤ図



☆各列車の着発を「ノード」で表現

PERT図



☆ノード間の順序関係を「アーク」で表現

図2 列車ダイヤ図とPERTでの表現

いては乱れたダイヤの早期回復に寄与する研究開発を進めています。ここでは、数学的手法やAIを活用した運転整理の支援に関する最近の取り組みを紹介します。

運転整理の支援に必要な技術

指令員の運転整理業務を支援するために、運転整理の具体的な方法を示す運転整理案をコンピューターで自動作成する手法の研究開発が行われています。運転整理案を作成するためには、おもに2つの技術が必要です。1つ目は正確な予測ダイヤ[®]を作成する技術です。現在の各列車の遅延状況をもとに、今後の列車運行がどのように推移するか、遅延がどうなるかを精度よく予測することで、適切な運転整理方法を検討することが可能となります。2つ目は、複数の運転整理方法のなかから適切な方法を選択する技術です。列車の運休や車両運用の変更を数多く行うことでダイヤの早期回復は可能ですが、むやみな列車の運休は輸送力の低下につながり旅客への影響が大きいため、変更は少ない方が望ましいとされています。また、運転整理は今

まさに発生している事象を対象とするため、なるべく短時間で作成する必要があります。以下では、予測ダイヤ、運転整理案のそれぞれの作成手法について紹介します。

予測ダイヤの作成手法

予測ダイヤの作成では、時々刻々と変わる遅延や乗車率、指令員が実施した運転整理を反映しながら各列車の着発時刻を予測計算する必要があります。この予測計算を実現するために、2種類の手法を開発しています。

予測ダイヤ

時刻表で示される各駅の出発時刻は、列車の運行計画を指す列車ダイヤにより決められています。ある時点から先の列車運行の予測を示すものを予測ダイヤとよび、各列車の、先の駅の到着時刻や出発時刻の情報を含みます。列車ダイヤは、通常、横軸に時間、縦軸に駅をとり、時間とともに進む列車の軌跡を直線で表した「列車ダイヤ図」とよばれる図表で示されますが、予測ダイヤも同様の図表で示すのが一般的です。指令員は実際に予測ダイヤを作成したり、あるいは頭の中に思い浮かべたりしながら、運転整理の方法を検討しています。

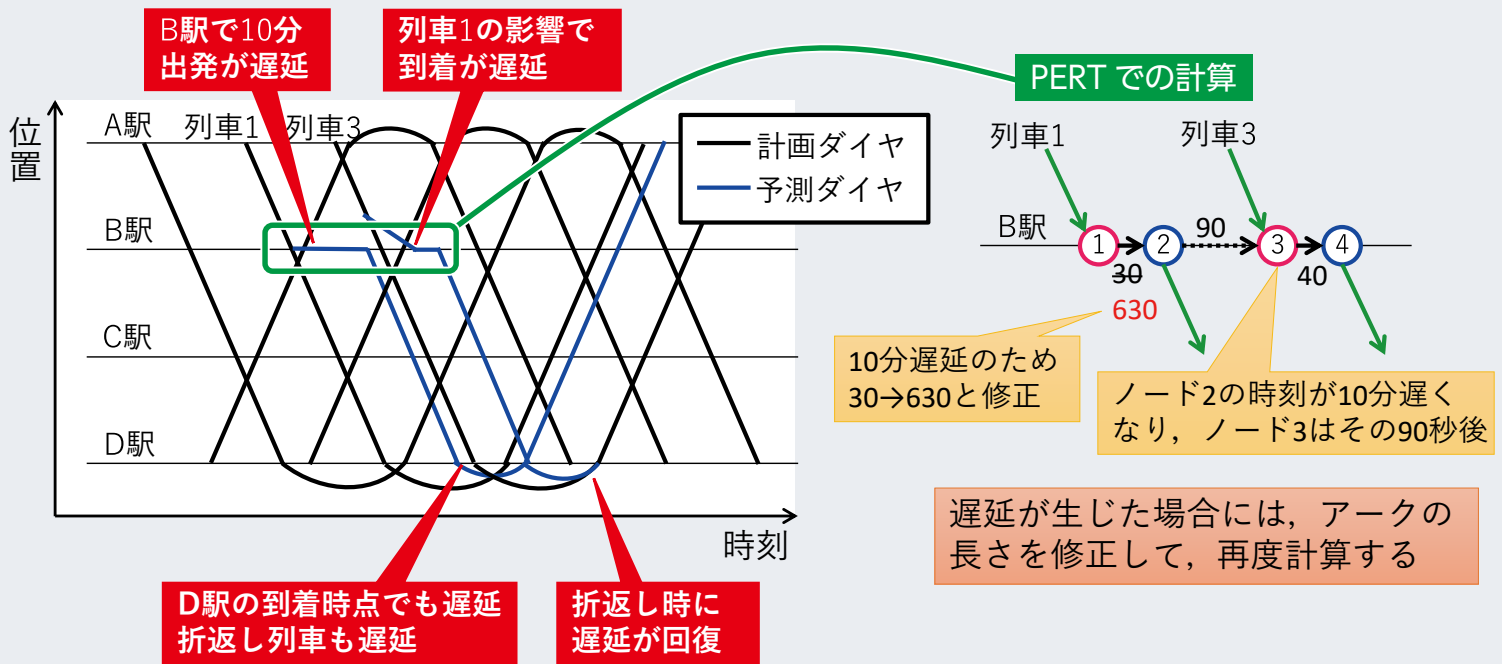


図3 予測ダイヤの例とPERTでの計算

数学的手法の活用

工事の工程や製造プロセスを管理するために用いられる手法の一つに、PERT[®]とよばれる数学的手法があります。このPERTを活用することで列車の着発時刻を短時間で予測計算する手法を開発しました¹⁾。まず、各列車の到着および出発をPERTにおけるイベントやマイルストーンに相当する「ノード (図2中の○)」として表現し、各ノード間の順序関係を「アーク (矢印)」で結ぶことで、ダイヤ図をPERT図として表現します (図2)。このPERT図では、列車のある駅の出発を意味するノードと次の駅の到着を意味するノードを結ぶアークで走行時分や停

PERT (Program Evaluation and Review Technique)

一般的に、プロジェクトのスケジュール管理で使用される数学的手法の一つです。プロジェクトの過程にあるイベントやマイルストーンをノードとして表し、ノード間で実施される作業をアークとして表現したPERT図とよばれる図表によりプロジェクトの各工程にある依存関係を視覚化します。PERT図を使うことにより、全体工程のなかでボトルネックになっている作業を抽出することができ、プロジェクト全体の工期を短縮することが可能です。

車時分を、ある駅における異なる列車のノードを結ぶアークで列車間隔を表します。これにより、列車ダイヤ図上の変更は、PERT図上でのノードの位置 (=着発時刻) とアークの長さ (=駅間の走行時間や駅での停車時間) を変える処理として置き換えることができます。この手法では、アークの長さを使うことで、あるノードの時刻が変更されたときのほかのノードの時刻を加算と減算のみで計算できるため、予測ダイヤをきわめて短時間で作成することが可能となりました。

計画ダイヤと、上述した手法で作成した予測ダイヤを、列車ダイヤ図の形式で重ねて表示した例を図3と図4に示します。図3は、列車1がB駅で何らかの要因により10分の遅延が発生した場合の例です。PERT上では、列車1の停車時分アークの長さを修正し再度計算することで、予測ダイヤを作成できます。図4は、大雨や強風などにより速度規制が生じたことを想定した例です。この例では、走行時分アークの長さを修正することで規制を考慮した予測ダイヤを計算できます。

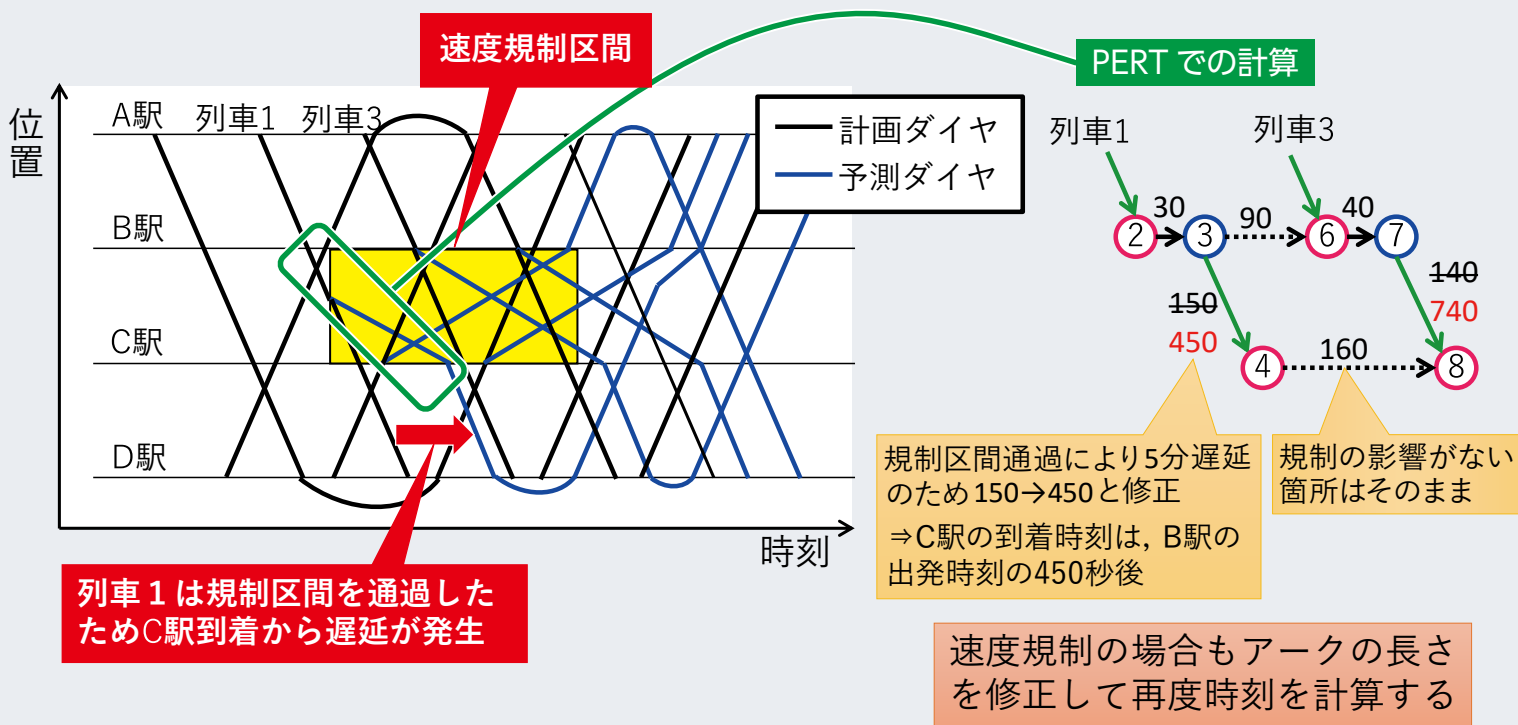


図4 速度規制時の予測ダイヤの例とPERTでの計算

AIの活用

PERTによる手法では、現在の遅延が継続するなどの前提を置いていました。しかし、実際の列車運行は、前後の列車の遅延状況や、各列車の特徴（快速や普通などの種別、行先など）などに依存して、その後の運行が複雑に変化することがあります。

そこで、AIを活用し、過去の列車運行の実績データを用いて遅延の傾向をつかむことで、より精度の高い予測ダイヤを作成する研究開発も進めています²⁾。研究の初期段階ではニューラルネットワーク (NN)^④ を活用していましたが、予測精度を向上させるために、深層学習の1つであるLSTM^⑤ とよばれる手法を採用することにしました。NN, LSTMともに、学習した過去の実績データに多く含まれている数分程度の慢性的な遅延を、精度良く推定することが可能です。しかし、NNでは、予測対象の列車やその前を運行する列車の遅延や乗車率の情報を入力として、数駅先までの遅延を一度に予測するため、過去の実績データに存在しないような突発的な遅延が発生した場合の予測が

困難です (図5左)。これに対しLSTMでは、ある駅での遅延の情報を入力として、次の駅での予測を繰り返して行きます (図5右)。そのため、LSTMは、予測当日の遅延の変化の傾向を予測に反映できるという特長をもちます。NNとLSTMの双方の予測誤差を比較したところ、LSTMの採用によって予測精度を向上できるこ

④ ニューラルネットワーク (NN)

脳内の神経細胞 (ニューロン) のネットワーク構造を模した数学モデルで、もっとも基本となるモデルは、入力層、中間層、出力層の3層からなるネットワークモデルです。入力値に対し正しい出力値がわかっている学習データを用いて、ニューラルネットワークの出力と正しい出力値の誤差が小さくなるように、各層間の結合 (重み) を調整します。ニューラルネットワークはパターン認識、データ分類や未来の予測など幅広く活用されており、深層学習の基礎となっている手法です。

⑤ LSTM (Long Short Term Memory)

LSTMは深層学習 (ディープラーニング) の手法の1つで、時間の経過により変化するデータの学習に適したネットワークモデルとして提案されました。一般的なニューラルネットワークモデルと比べ、短期から長期の情報を柔軟に学習し、予測できることが特徴です。

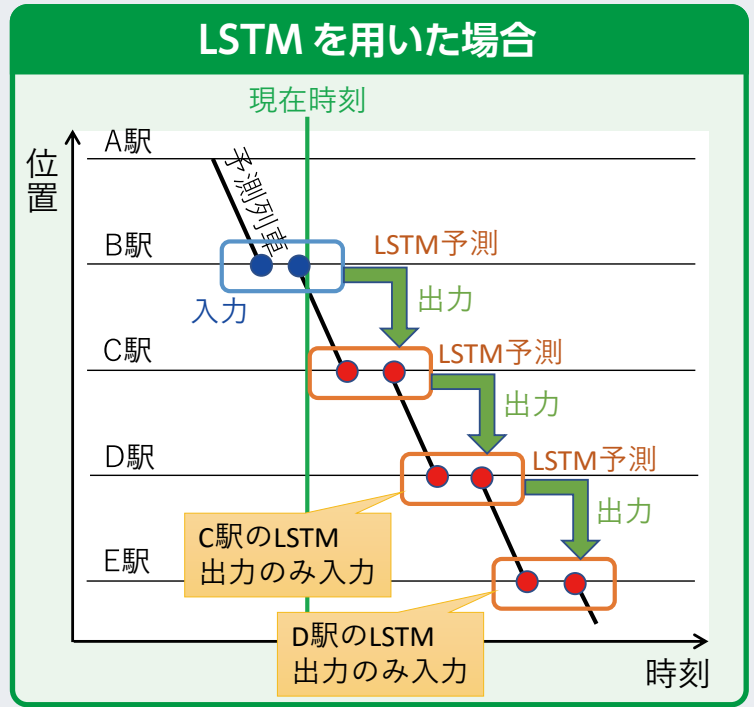
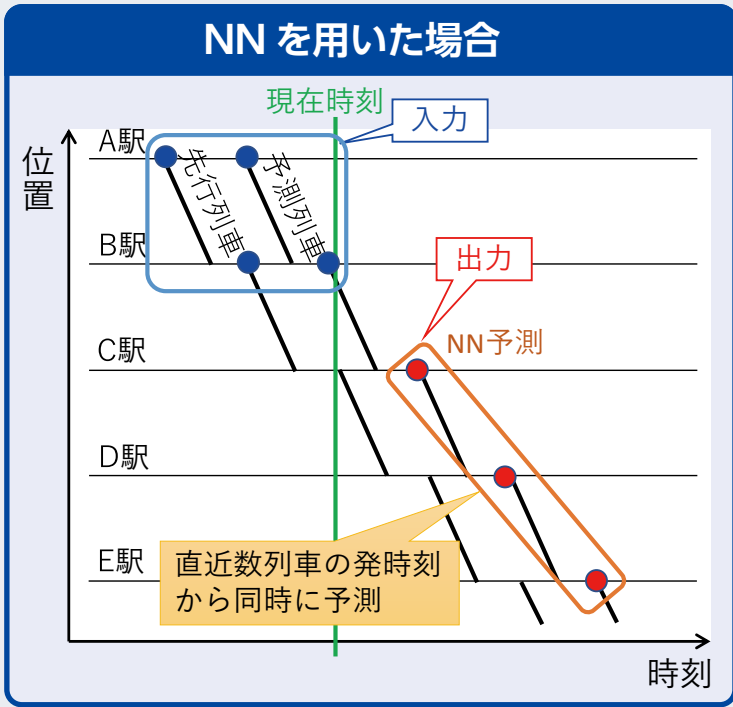


図5 NNとLSTMによる遅延予測方法の違い

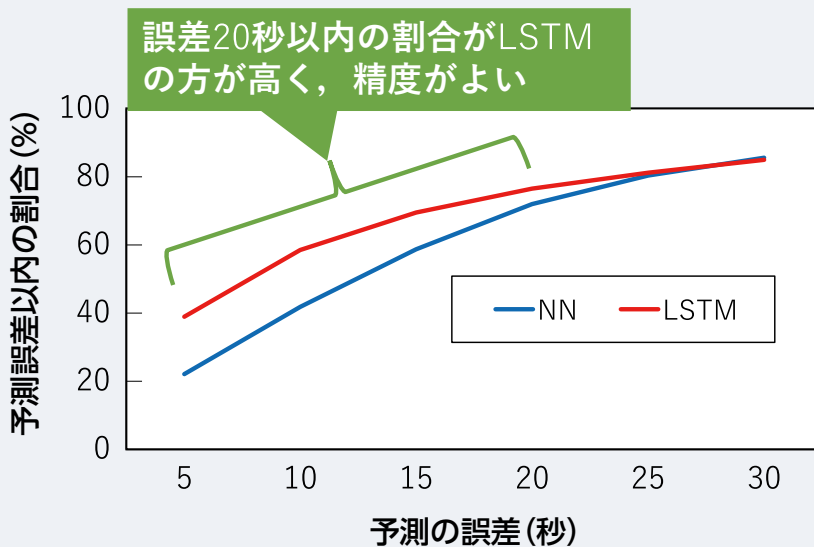
とが確認できました (図6)。一方で、LSTMは計算手順が複雑であるため、NNより時間を要することが課題です。

運転整理案の作成手法

運転整理案の作成では、十分な輸送力を確保

したうえで、なるべく少ない変更でダイヤ回復の効果が高い運転整理方法を決める必要があります。多くの前提や条件を考慮しなければなりません。そこで、予測ダイヤに基づいて、多くの条件を考慮しながら全体的な最適化を得意とする**数理最適化**とよばれる数学的手法を用いた手法を

図6 NNとLSTMの予測精度の比較



数理最適化

工場の生産計画の作成、トラックの輸送ルートを作成など、世の中で行われている多くの計画作成の作業は、利用できるリソースなどの制約条件があるなかで、利益や効率を最大化したりコストを最小化できる計画作成する数学的な問題としてとらえることができます。このような効率やコストなど何らかの評価項目を最適にする問題を「最適化問題」とよびますが、最適化問題を数学的な手法により解くことを数理最適化とよびます。数理最適化を適用するためには、決定したい内容を変数として定義して、制約条件および評価項目を定義した変数で表現することで、数学の問題に帰着させる(=定式化する)必要があります。現実の条件を適切に表現でき、かつ数学的に解ける問題として定式化するのは容易なことではなく、多くの技術・ノウハウが求められます。

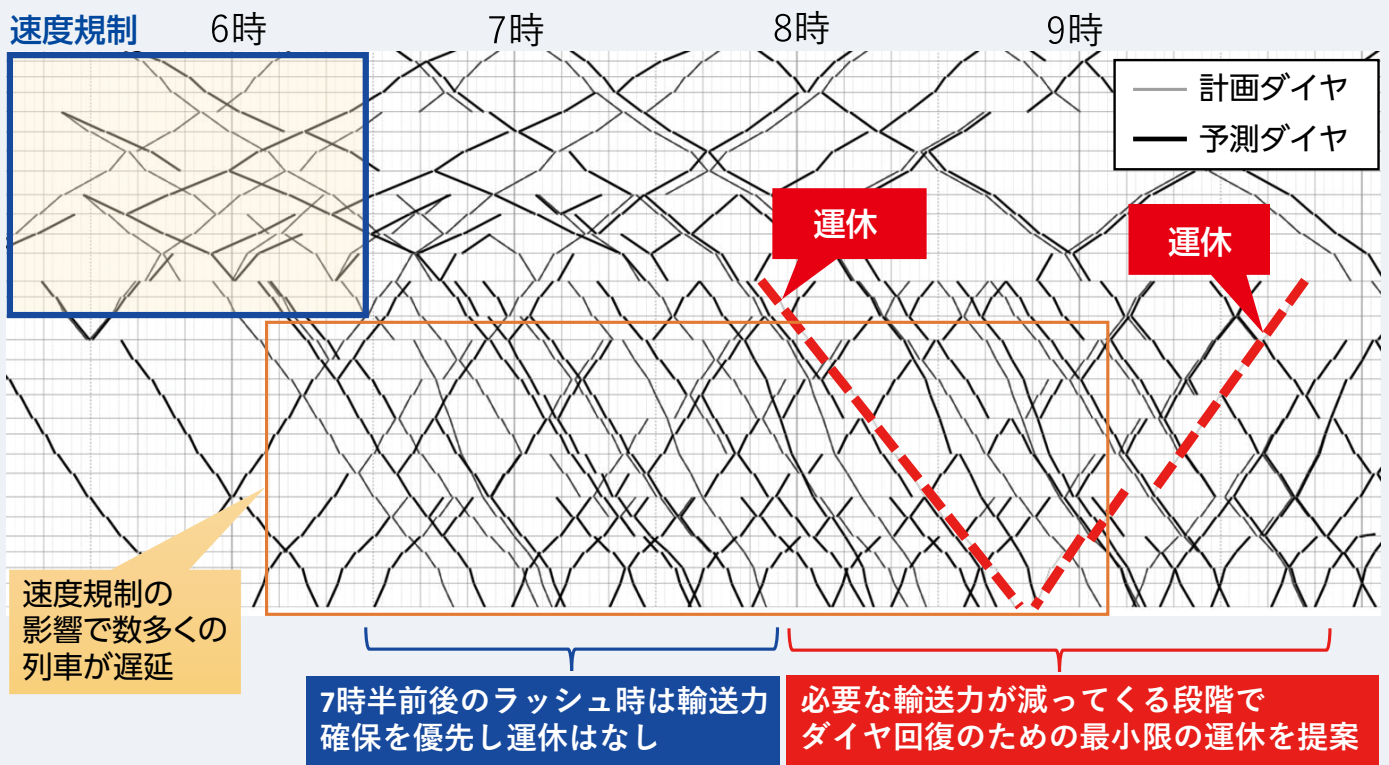


図7 開発手法による運転整理案の作成結果

開発しました³⁾。具体的には、輸送力をもっとも多く確保でき、かつ変更数をもっとも少なくなるように、運休や車両運用変更など多くの整理方法の選択肢のなかから最適な組み合わせを選択する数学的な問題として定義して解く手法を提案しました。また、指令員が実際にしている運転整理の考え方を取り入れ、必要な輸送力を確保できれば運休を許容するなど、トレードオフの関係にある遅延を少なくすることと、変更数を少なくすることの双方を考慮した運転整理案を作成できるようにしました。また、開発手法では、予測ダイヤ計算と運転整理案計算を分離することで、短時間での計算を可能としました。

1日の列車本数が約200本の線区において、大雨による速度規制が実際に生じてダイヤが乱れた事例を対象として、運転整理案の作成を試

行しました。なお、予測ダイヤはPERTによる手法を用いて作成しました。その結果、2本の列車の運休が提案されました(図7)。このように、変更を最小限とした運転整理案を作成できます。

この事例は速度規制を想定したものですが、開発手法は事故の発生などのダイヤ乱れにも幅広く適用することができます。

おわりに

運転整理の支援に関する技術は日々着実に進歩しており、近年ではAIや数理最適化を活用する研究開発が増えてきました。今後は各研究成果をいかにして融合し、指令員の支援につなげられるかが課題と考えています。引き続き、乱れたダイヤの早期回復に貢献できる研究開発を進めていきます。RRR

文献

- 1) 富井規雄, 田代善昭, 田部典之, 平井力, 村木国満: 顧客満足度を考慮した運転整理アルゴリズム, 鉄道総研報告, Vol.18, No.12, pp.7-12, 2004
- 2) 辰井大祐, 中挟晃介, 國松武俊, 坂口隆: 深層学習を用いて列車遅延を予測する, RRR, Vol.78, No.7, pp.12-15, 2021
- 3) 加藤怜, 坂口隆, 佐藤圭介: 速度規制時の車両運用変更提案手法, 鉄道総研報告, Vol.32, No.12, pp.5-10, 2018