

運転整理の評価指標の提案と運転整理手配の分析・評価手法

高田 真由* 國松 武俊* 田中 峻一*

Proposal of Evaluation Metric for Train Rescheduling and Analysis and Evaluation Method for Train Rescheduling Arrangements

Mayu TAKADA Taketoshi KUNIMATSU Shunichi TANAKA

To support dispatchers in their traffic rescheduling operations during transport disruptions, the authors propose the concept of "number of late-arriving passengers," develop a new operational adjustment simulator, and propose an analysis method for evaluating the impact of implemental adjustment plans on passenger convenience. Specifically, each item is as follows: Firstly, the "number of late-arriving passengers" is used as an evaluation metric for comparing different traffic rescheduling plans, representing the number of passengers whose arrival delay at a station exceeds a threshold. Secondly, the train rescheduling simulator predicts timetables based on different rescheduling arrangements. Finally, the proposed method for analysis uses the number of late-arriving passengers to determine which period and section of travel convenience has changed due to changes in traffic rescheduling arrangements. In this paper, we describe the three items mentioned above in detail.

キーワード：運転整理，列車ダイヤ，輸送計画，単線路線，旅客行動，評価指標

1. はじめに

人身事故等に起因してダイヤ乱れが発生すると、乱れたダイヤを元に戻すために、運転整理が行われる。運転整理では、旅客の利便性が低下しないよう、適切な運転整理手法が求められている。

鉄道事業者では、旅客の利便性が低下しない運転整理ができるよう、指令員が実施した運転整理を振り返り、より望ましい運転整理手配が無かったか、他の運転整理案の検討および実際の運転整理との比較が行われる（図1）。この比較においては、仮に他の運転整理案を実施した場合の列車運行状況を予測し、旅客の利便性を反映した評価指標を用いて、定量的な相対評価ができる手法を用いることが望ましい。

旅客の利便性を反映できる評価手法については、実際に行われたものとは異なる運転整理に対して旅客への影響度合いを定量的に算出できる評価指標が無いため、どちらが相対的に良い運転整理案かを判断するための分析・評価手法が確立されていないという課題がある。実務では、運転整理の評価指標として、各列車・各駅の遅延量の総和である総遅延時分や、列車の運休本数、ダイヤ乱れ発生からダイヤ回復までの

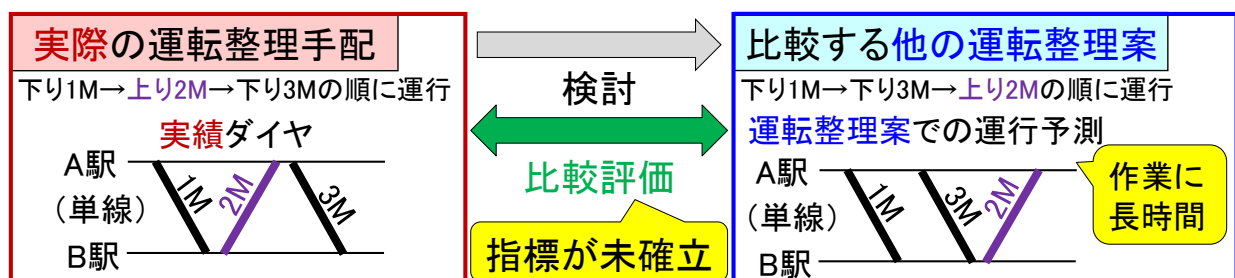


図1 運転整理の振り返り

* 信号技術研究部 運転システム研究室

時間等が用いられてきたが、旅客への影響を適切に評価できないという課題がある。先行研究では、利用者の不効用に基づく手法¹⁾がある。これは、シミュレーションにより、輸送障害時の移動時間、乗換、混雑を推定し、利用者が受ける不効用を時間単位に換算することで、平常時と比較する手法である。また、ICカードの平常時所要時間との差分に基づく手法²⁾は、輸送障害時のICカードデータをもとに、利用者が実際に受けた影響を評価する手法である。いずれの手法も、旅客の目的駅到着遅延の合計を評価値の一部としているため、目的駅到着が1分遅延した旅客が10人いた場合と、目的駅到着が10分遅延した旅客が1人いた場合の区別はできない。また、影響を受けた時間と旅客の人数の積である「POINT」に基づく手法³⁾では、輸送障害の発生場所・発生時刻・運転再開時刻・運休本数をもとに、輸送障害の規模感を評価する指標が提案されている。しかし、運転再開時刻や運休本数が変化しない手配を実施した場合には評価値は変化しない。また、ICカードの平常時所要時間との差分に基づく手法と、「POINT」に基づく手法は、輸送障害が発生した際に得られるデータを使用しているため、実際の運転整理手配以外の他の運転整理案に対する評価値を算出できないという課題がある。

そこで本研究では、運転整理の振り返り作業の品質向上を目的に、実際に行われた運転整理手配以外の運転整理案に対しても適用可能な評価指標を提案した。また、提案した評価指標を用いて、複数の運転整理を比較・分析して手配案の適否を判断する手法を構築した。そして、単線区間・複線区間が混在する通勤路線を対象に、提案手法を用いたケーススタディを行い、提案手法の有用性を確認した。

2. 運転整理の分析・評価手法

2.1 評価指標の基本的な考え方

運転整理の変更による旅客の利便性の変化を手配に対する良否の評価に反映するためには、旅客行動の変化に応じて評価値が変化することが望ましい。先行研究²⁾の手法は、輸送障害時のICカードデータを用いているため、運転整理を変更した場合の評価値を算出できない。先行研究³⁾の手法は、輸送障害の規模感を評価する指標を求めているため、運転再開時刻や運休本数が変化しない手配を実施した場合には評価値は変化しない。運転整理を変更した場合にも適用可能で、運転再開時刻や運休本数が変化しない手配でも、旅客行動の変化による運転整理の相違が測れる評価指標が望ましい。そこで、個々の旅客の出場駅への到着時刻をもとにした評価指標を定義し、複数の運転整理案を相対評価する手法を定めることとした。

まず、ある運転整理案を実施した場合、各旅客が出場駅への到着が平常時と比べてどれだけ遅れたかを、「到着遅延時分」と定義した。そして、設定した到着遅延時分の閾値を超える旅客の総数を、「到着遅延人数⁴⁾」と定義し、運転整理の評価指標とした。この到着遅延人数を、複数の運転整理案に対して計算し、大小関係を比較したうえで、「到着遅延人数がより小さい方が良い運転整理案」という評価手法を定めた。

到着遅延時分は、平常時の自動改札機データ、計画ダイヤ、評価対象の運転整理案を実施した場合の予測ダイヤから推計できるため、輸送障害時の自動改札機データを必要としない。したがって、到着遅延時分、および、到着遅延人数は、実際の運転整理手配以外の他の運転整理案に対しても算出可能である。

2.2 到着遅延人数の算出フロー

到着遅延人数の算出フローを図2に示す。

まず、ある運転整理手配を実施した場合に想定される運行状況（予測ダイヤ）を、運転整理シミュレータを用いて推定する。次に、平常時の自動改札機データを用いて、当日の計画ダイヤ、予測ダイヤのそれぞれに対し、各旅客の列車乗継経路を推定する。このとき、それぞれのダイヤにおいて旅客が最も早い時間で

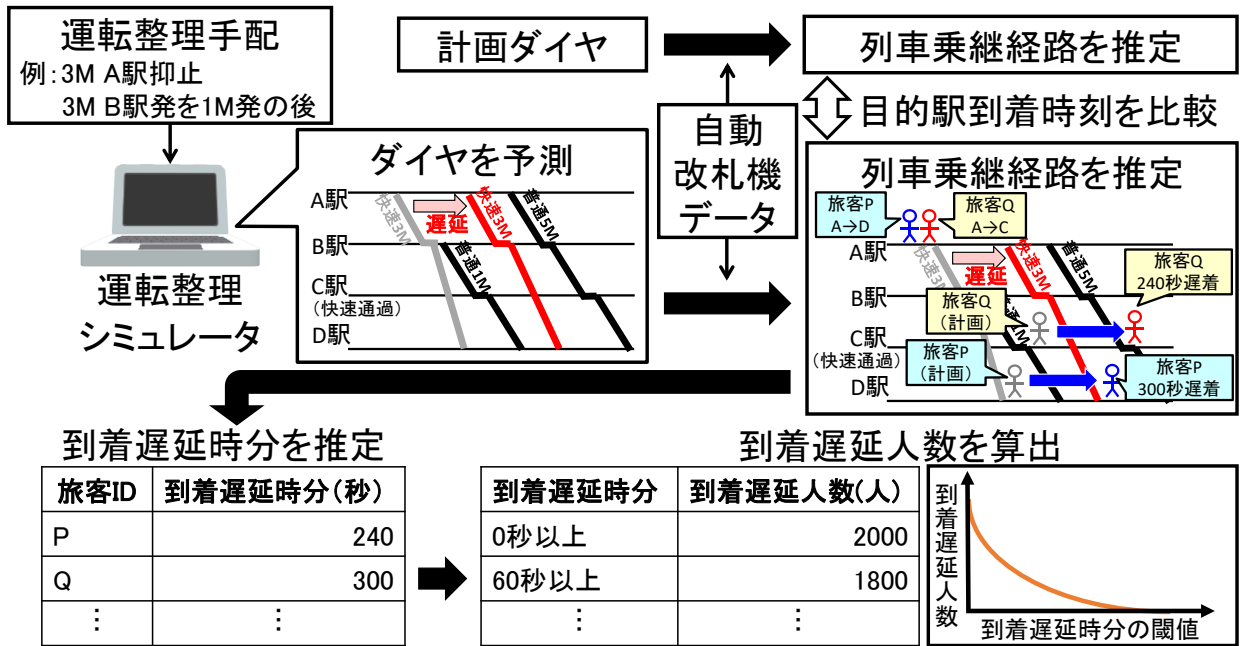


図2 到着遅延人数の算出フロー

目的駅に到着できる列車に乗車するという前提とした。

そして、計画ダイヤと予測ダイヤにおける列車乗継経路の推定結果を旅客1人1人について比較することで、予測ダイヤの到着遅延人数を、様々な到着遅延時分の閾値に対して算出する。

以下、2.3節で列車乗継経路と到着遅延時分の推定方法の概要、2.4節で複数の運転整理案の比較・分析手法について述べる。また、2.5節で運転整理手配からダイヤを予測するための運転整理シミュレータについて述べる。

2.3 到着遅延時分の算出方法

各旅客の到着遅延時分は、出場駅への到着が計画と比較してどのくらい遅れたかを表す。到着遅延時分の算出方法を図3に示す。具体的には、A駅からD駅に向かう旅客Pは、計画ダイヤではA駅から快速3Mに乗り、D駅へ向かうが、仮に快速3Mが遅延した場合には、遅延した快速3Mを利用するため、D駅の到着が遅れる。また、A駅からC駅へ向かう旅客Qは、計画ダイヤではA駅から快速3Mに乗りB駅で乗り換え、普通1MでC駅へ向かう。しかし、仮に快速3Mが遅延した場合には、旅客QはB駅での普通1Mへの乗換ができないため、後続の普通5Mに乗り換えることになり、C駅の到着が遅れる。このように、各旅客について、計画ダイヤと輸送障害が発生したダイヤのそれぞれの利用経路と出場駅への到着時刻を予測し、到着遅延時分を推計する。

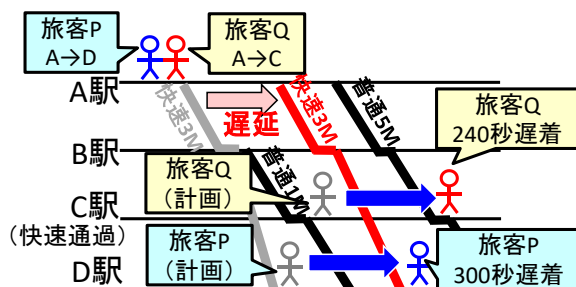


図3 旅客の到着遅延時分

2.4 複数の運転整理の比較・分析手法

前節までの方法により、平常時の自動改札機データと、運転整理手配を再現した場合の予測ダイヤを活用して、旅客の列車乗継経路を推定することで、様々な運転整理案に対しても、列車運行予測に基づいた旅客の利便性の観点による定量的な評価が可能となる。さらに、列車乗継経路推定結果を活用することで、遅延が増大した旅客は、どの列車を利用したのかという詳細な比較・分析も可能となる。具体的な比較・分析手法は以下の通りである。

まず、到着遅延人数を比較し、運転整理案の良し悪しを判定する。具体的には、複数の運転整理案に対して、様々な到着遅延時分の閾値を設定して到着遅延人数を計算する。そして、横軸に到着遅延時分の閾値を、縦軸に到着遅延人数を取るグラフを作成して、到着遅延人数を可視化する。このグラフにより、「多くの閾値について到着遅延人数が小さい方が良い運転整理案」と判定する。

次に、2つの運転整理案で到着遅延人数に差がある要因となる運転整理手配を特定するための分析を行う。具体的には、まず、2つの運転整理案で目的駅到着時刻が変化した旅客に限定して、到着遅延時分をクロス集計して2次元ヒストグラムで表示する。さらに、到着時刻の差が大きかった旅客が利用した列車の乗車人数を表す色付きダイヤ図を用いて、旅客の目的駅到着がより遅れる原因となる列車を可視化し、その列車に対する運転整理手配を特定する。

2.5 運転整理シミュレータ

実際の運転整理手配以外の運転整理案を作成する場合は実績ダイヤが無いため、予測ダイヤを作成する必要がある。しかし、複数の運転整理手配が関係しあう中、基準運転時分や停車時分の確保、運転時隔の考慮、順序関係等、様々な制約を考慮して、全列車・全駅における到着・発車時刻を予測する計算を順番に行う必要があるため、単純な線区を除き、手作業での推定は困難である。

そこで、図2に示した算出フローを効率的に行うため、運転整理手配を画面上で入力でき、入力された運転整理手配に応じて、先行研究⁵⁾のダイヤ予測手法に基づいて予測ダイヤを計算・表示し、計算された予測ダイヤに対し、評価指標である到着遅延人数を求める運転整理シミュレータを開発した。

なお、運転整理シミュレータを用いて、実際の運転整理手配と他の運転整理手配を比較する際は、条件をあわせることが必要である。しかし、実績ダイヤでは、駆け込み乗車等による駅停車時分の増大や、運転士の運転操作による駅間走行時分のばらつき等、当日発生した停車時分や走行時分のゆらぎが含まれている。一方で、運転整理シミュレータで作成する予測ダイヤでは、停車時分や走行時分は最小停車時分・基準運転時分を基本としており、当日のゆらぎが含まれていない。

そのため、実際の運転整理手配に対して評価を行う場合には、当日の実績ダイヤをそのまま用いずに、当日の運転整理手配を運転整理シミュレータに入力し、予測ダイヤとして出力された列車ダイヤを用いて評価を行う。

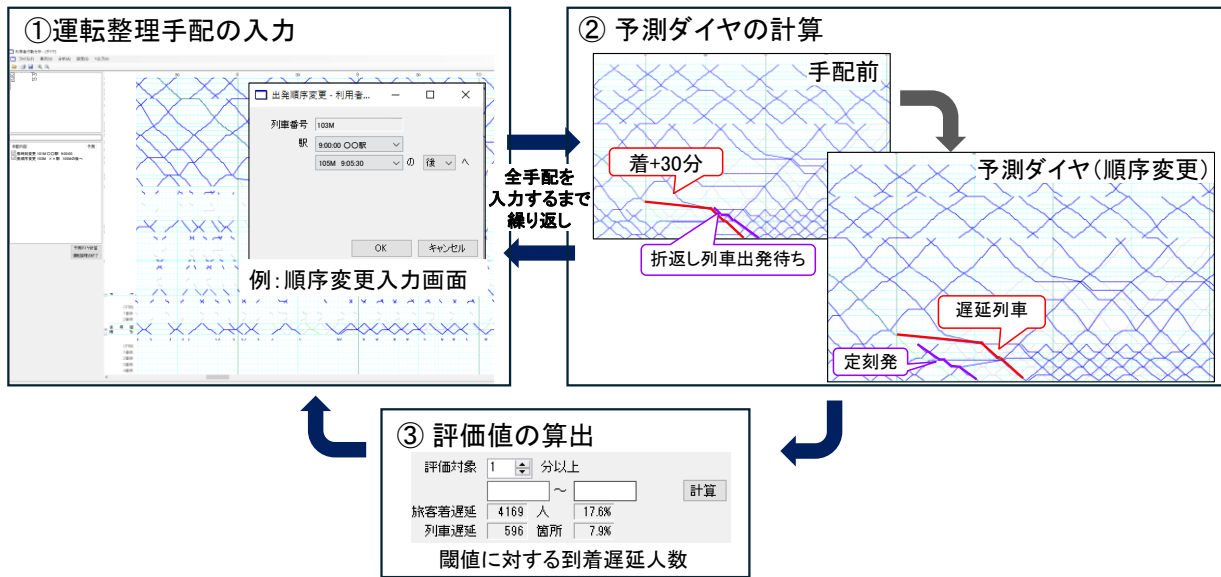
運転整理シミュレータは、図4に示す3つの主要な機能からなる。

(1) 運転整理手配の入力

画面上に列車ダイヤを表示し、画面上の列車スジ(列車線)を選択することで、その列車に関係する運転整理手配(運休、順序変更、時刻変更、車両運用変更等)を入力できる。

(2) 予測ダイヤの計算

入力された運転整理手配を適用した場合の予測ダイヤを求め、画面上に表示する。予測ダイヤの計算にあたり、速度を優先する理由から、グラフ理論を用いた手法を採用した⁵⁾。計算された予測ダイヤを見ながら、さらに運転整理手配を入力することも可能とし、運転整理手配の入力、予測ダ



ダイヤの計算を繰り返しながら運転整理案を作成することを想定している。

(3) 評価値の計算

作成された予測ダイヤに対し、指定された閾値に対する到着遅延人数を計算し、画面上に表示する。また、到着遅延人数の算出の他、各列車の駅間乗車率や遅延による列車線の色分け等を行い、視覚的に遅延や混雑を示すことも可能である。

3. ケーススタディ

3.1 ケーススタディでの運転整理の概要

提案する評価指標と分析・評価手法の有効性を確認する目的で、単線区間・複線区間が混在する通勤路線の実際の運転整理事例を対象に、ケーススタディを実施した。具体的には、以下の(a), (b)のダイヤを比較した。

- (a) 実際に行われた運転整理を反映したダイヤ（以下、実績再現ダイヤ）
- (b) 実際とは異なる運転整理を反映したダイヤ（以下、仮想ダイヤ）

(b)仮想ダイヤは、実際に行われた運転整理の一部手配を望ましくないものに変更することで作成した。(a)実績再現ダイヤと(b)仮想ダイヤに対し、到着遅延人数を算出して比較した。

ケーススタディでは、運転整理を一切実行しない場合や列車の追加運休を想定して、様々なケースを試行したが、ここでは代表例として、実際には運休した列車を運休しない手配を想定したケースを報告する。分析対象の実績再現ダイヤを図5(a)に示す。図5(a)に示す列車 T_1 が8:17にC駅を発車予定であったが、急病人対応により27分遅れで運転を再開した。(a)実績再現ダイヤでは、A~G駅間を走行する4本の列車を運休し、行き違い駅変更と、着発時刻の調整を行った。

一方、(b)仮想ダイヤでは、4本の運休手配を行わなかった場合を想定して、(a)実績再現ダイヤのA駅の上り列車間隔と、G駅の下り列車間隔が空いた箇所に、上り2本、下り2本の列車を追加し、行き違い駅の変更や着発時刻の調整を行って作成したものである。この(b)仮想ダイヤについては、運転整理の実務を行う指令員より、走行距離が長い列車の発車が(a)実績再現ダイヤよりも遅れるため、望ましくない旨の見解が得られている。この仮想ダイヤに対し、運転整理シミュレータにより作成した予測ダイヤを図5(b)に

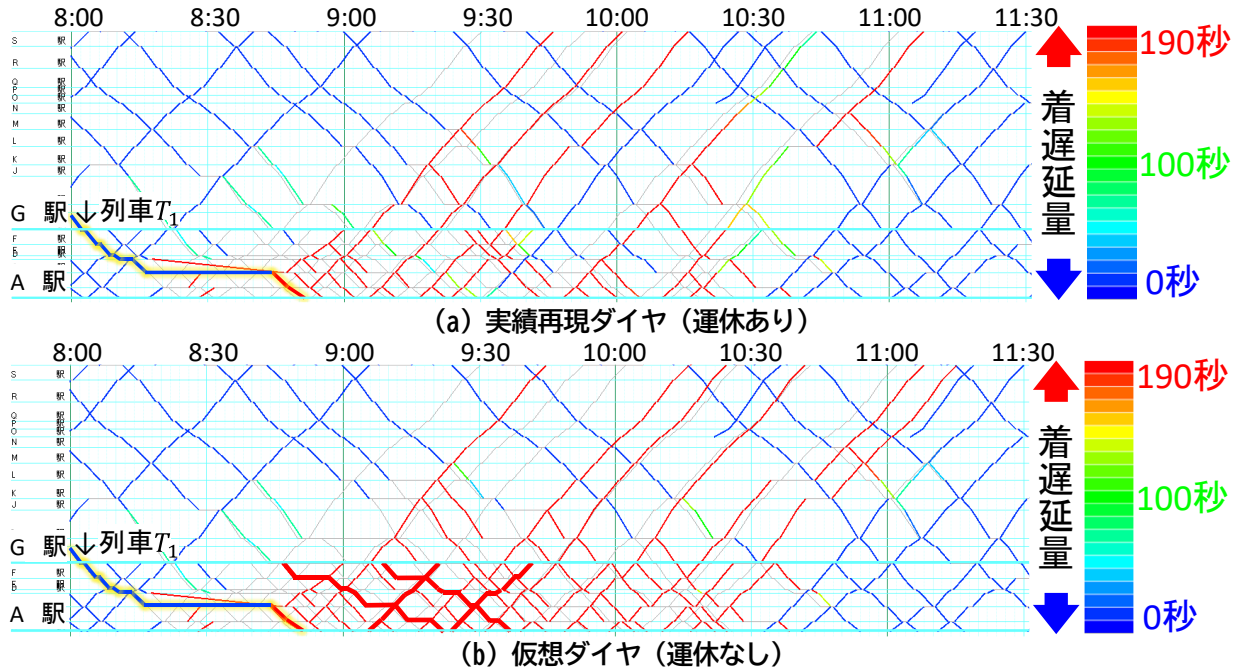


図5 列車の着遅延量による色付きダイヤ

示す。追加した4本の列車は赤太線で示されている。A～T 駅間を走行する列車の発車が遅れて、3分以上の遅延が11:15頃まで継続することがわかる。

3.2 到着遅延人数の比較結果

運転整理シミュレータを用いて、実績再現ダイヤと仮想ダイヤにおける到着遅延人数を算出し、比較した結果を図6に示す。ほぼ全ての閾値において、実績再現ダイヤの方が仮想ダイヤよりも到着遅延人数が小さくなっており、実績再現ダイヤの方が仮想ダイヤよりも良い運転整理だったと判定され、指令員の見解とも一致した。特に、閾値が3分以上18分以下での到着遅延人数に差があることがわかる。

3.3 2次元ヒストグラムによる到着遅延時分の分布の可視化

(a)実績再現ダイヤと(b)仮想ダイヤの到着遅延人数に差が出た原因を探るため、各旅客の各ダイヤでの到着遅延時分の分布に着目する。(a)実績再現ダイヤと(b)仮想ダイヤで目的駅到着時刻が異なる全旅客の到着遅延時分をクロス集計して、2次元ヒストグラムで可視化した結果を図7に示す⁶⁾。

全体的な傾向として、図7の左側に、暖色系のマスが多いことから、実績再現ダイヤは仮想ダイヤより

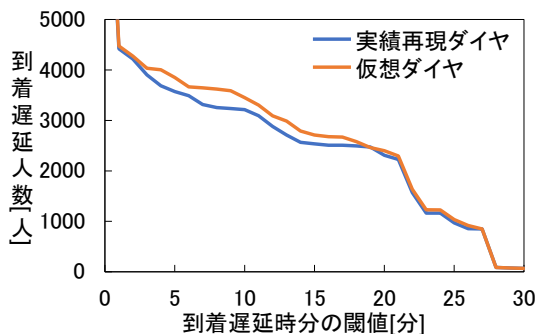
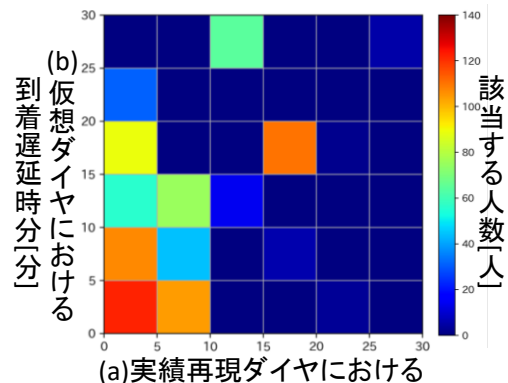


図6 到着遅延人数の比較結果



(a)実績再現ダイヤにおける到着遅延時分[分]

図7 2次元ヒストグラム

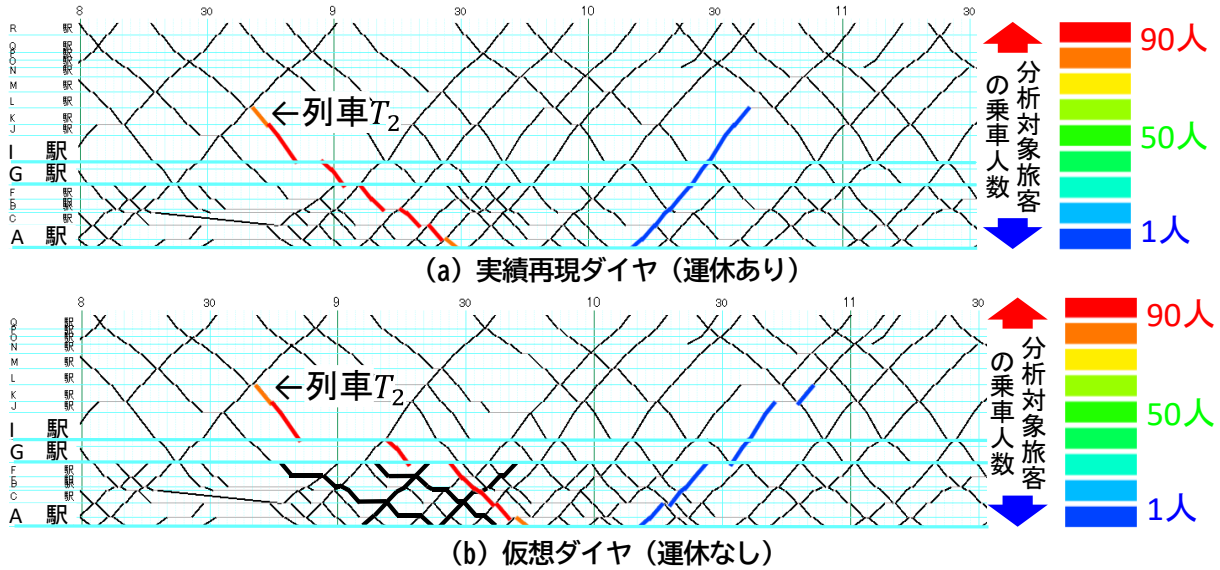


図8 分析対象旅客の乗車人数によるダイヤ

も、目的駅到着が早い旅客が多数存在することがわかる。

また、特に到着遅延時分の差が大きい暖色系のマスは、図6に示した到着遅延人数の差の主要因と考えられる。具体的には、実績再現ダイヤでは到着遅延時分が5分未満であったが、仮想ダイヤでは到着遅延時分が15分以上20分未満であった旅客等である。次節では、このマスに該当する旅客が、どの列車を利用するのかを分析し、影響の大きい列車や運転整理手配の抽出を試みる。

3.4 到着遅延人数への影響が大きい運転整理手配の抽出手法

前節で分析対象とした旅客89名が実績再現ダイヤと仮想ダイヤで乗車した列車を集計し、色付きダイヤで表示した結果を図8(a)および(b)に示す。図8(b)に黒太線で示す4本の列車は、実績再現ダイヤで運休した列車である。

図8(a)(b)より、分析対象旅客の多くは、列車 T_2 を利用することがわかる。この列車 T_2 の運行時刻を図8(a)(b)で比較すると、仮想ダイヤでは、実績再現ダイヤで運休となったG駅発の列車がG～A駅間を走行するため、実績再現ダイヤと比較して列車 T_2 のI駅出発が遅れている。これに伴い、列車 T_2 のA駅到着は、仮想ダイヤでは実績再現ダイヤと比較して、さらに15分30秒遅延している。すなわち、列車 T_2 のA駅到着遅延により、列車 T_2 に乗車しA駅を目的駅とする83名の旅客の到着が遅れることがわかる。これより、実績再現ダイヤにおける、G～A駅を走行する列車4本を運休し、T～A駅を走行する列車 T_2 のI駅出発を早める運転整理手配は、旅客の到着遅延時分を増大させないために効果的であったと分析できる。

本稿で紹介した事例以外でも、指令員が望ましいと考えるほうの運転整理が判別できることや、評価結果に影響を与える運転整理手配を特定できることを確認している。以上より、本対象路線においては、到着遅延人数による複数の運転整理案の比較・分析手法の有用性を確認した。

3.5 実務で用いられる評価指標

3.1節で示した2つのダイヤに対して、運転整理の実務で用いられる評価指標である「ダイヤ回復までの時間、列車の運休本数、列車の総遅延時分」を計算して比較し、運転整理案の良し悪しを判定できるか否かを確認した。

評価指標の計算結果を表1に示す。(a)実績再現ダイヤと(b)仮想ダイヤを比較した場合に、ダイヤ回復ま

表1 評価指標の比較

評価指標	(a)実績再現ダイヤ	(b)仮想ダイヤ
ダイヤ回復までの時間[時間]*1	2.4	2.5
列車の運休本数[本]	4	0
列車の総遅延時分[時間]*2	29.9	63.0

*1: 運転再開から列車の遅延が1分未満になるまでに要した時間

*2: 全駅・全列車の到着遅延の和

での時間の増分は0.1時間と、ほとんど変わらない。また、運休本数と総遅延時分は、一般的にトレードオフの関係にある。列車を運休すると評価指標の計算対象となる列車が減るため、列車の総遅延時分は小さくなるためである。したがって、この2つの指標は同時に比較する必要があり、運休本数が同程度であった場合は、総遅延時分が小さい方が良い運転整理案と考えられる。しかし、本稿のケーススタディのように、運休本数が異なる運転整理案を比較する場合には、どちらの運転整理案がより望ましいかを明らかにすることができない。従って、実務で用いられる評価指標では、今回のケーススタディで扱った2つの運転整理案の良し悪しを明確には判定できないことがわかる。

これに対し、本研究で提案した到着遅延人数は、3.2節で示したように、ほとんどの閾値で(a)実績再現ダイヤよりも(b)仮想ダイヤの方が大きく、実績再現ダイヤの方が良いと判定できており、指令員の見解とも一致した。以上のケーススタディの結果より、到着遅延人数は実務で用いられる評価指標では判定できない良し悪しを測れることを確認した。

4. まとめ

本研究では、運転整理の振り返り作業の品質を向上させることを目的として、実際の運転整理以外の他の運転整理案に対しても算出可能で、利用者の利便性を反映した評価指標を提案し、それをを用いた評価手法を提案した。具体的には、運転整理の評価指標として到着遅延人数を提案し、到着遅延人数が小さい方がより良い運転整理案という評価手法を示した。また、運転整理手配を入力することで予測ダイヤを計算し、その予測ダイヤの評価指標を算出可能な運転整理シミュレータを開発した。これらにより、到着遅延人数や到着遅延時分を用いた運転整理の良し悪しの判定や、評価結果に差が生じる要因となる運転整理手配や列車を特定するための比較・分析手法を構築した。

ケーススタディとして、実績再現ダイヤと一部の運転整理手配を望ましくないものに変更した仮想ダイヤを運転整理シミュレータで作成し、到着遅延人数を算出、比較した。その結果、到着遅延人数は実績再現ダイヤの方が小さくなることを確認し、評価指標が適切であることを確認した。また、2つのダイヤの到着遅延人数に差が生じた要因を分析するため、2次元ヒストグラムで到着遅延時分の差が大きい旅客を抽出し、列車ダイヤ上で乗車人数を可視化する分析をした結果、評価結果に差が生じる要因となる運転整理手配を抽出できることを確認した。

今後は、本提案手法が複線路線や異なる種別の列車の接続がある場合にも適用可能かどうかの検証や、提案した評価指標に基づいた運転整理自動作成アルゴリズムの開発を行う予定である。

文献

- 1) 小林里紗, 家田仁, 柴崎隆一, 寺部慎太郎: 利用者の利便性から見た非常時の運転整理ダイヤの評価, 第7回鉄道連合シンポジ

ウム J-Rail 2000, No.3408, pp.379-382, 2000

- 2) 角田史記, 加藤学, 大塚理恵子, 助田浩子, 大関一博: 交通系 IC カードを利用した鉄道輸送障害時の影響を定量化する方法の研究, 情報処理学会論文誌データベース, Vol.6, No.3, pp.187-196, 2013
- 3) 館雅憲, 福山浩史: 輸送安定度指標「POINT」の開発と全社展開, 第 44 回サイバネ・シンポジウム論文集, No.101, 2007
- 4) 高田真由・國松武俊: 単線路線の運転整理に対する評価指標の考察, 第 29 回鉄道連合シンポジウム J-Rail 2022, S5-1-3, 2022
- 5) 田中峻一: 交差支障競合時の順序関係を考慮した予測ダイヤ作成手法, TER-23-042, MSS-23-008, 2023
- 6) 高田真由・國松武俊: 運転整理の変更により影響を受ける旅客の抽出・可視化手法, 令和 6 年電気学会全国大会, K503-A1, 2024