

運行実績・乗車率データを活用したダイヤ乱れ時の 旅客流動分析手法

國松 武俊* 平井 力*

Analysis Method of Passenger Flow under Disrupted Train Traffic by Using
Accumulated Passenger Data

Taketoshi KUNIMATSU Chikara HIRAI

When a train operational disturbance occurs, it is important to reschedule disrupted train traffic appropriately, considering passenger flow. In this research, we use accumulated passenger data to estimate passenger flow under disrupted train traffic. We first have devised a visualization method to understand the relationship between rescheduling arrangements and passengers' flow. We have also conducted multiple regression analysis of collected data under timetable disruption having occurred in the recent one year, and have developed an estimation model for passengers' flow under timetable disruption. We have verified the proposed methods by applying actual cases on train traffic disturbances, and confirmed the reliability or effectiveness of them.

キーワード：ダイヤ乱れ，旅客流動，運転整理，実績データ，可視化，重回帰分析

1. はじめに

列車の運行に乱れが生じた場合には、列車運行をダイヤ通りに戻すために、列車の運休、順序変更、運用変更等の一連の変更手配が行われる。これを「運転整理」と呼ぶ¹⁾。運転整理の実施にあたっては、極力早く計画ダイヤ通りの運行に回復させることの他に、運転再開前後の利用者に不便をかけないことも重要である。鉄道事業者では、指令室で線区全体の運転状況を把握し、必要に応じて支障区間以外での折返運転等を実施して、利用者の利便性低下を防止している。しかし、ダイヤ乱れ時の旅客流動は、利用者が他の路線へ迂回したり、駅の案内放送を参考にして平常時とは異なる列車を選択したりするため、把握が困難であり、指令員が経験に基づき推定しているのが現状である。

一方近年では、日々の列車運行の実績データや、利用者データを収集、蓄積する基盤が整いつつある。具体的には、各列車、各駅の着発時刻の実績値や、各列車、区間の乗車人数、利用区間、時間帯別の利用者数データ(ODデータ)等である。これら日々収集、蓄積されるデータを活用すれば、ダイヤ乱れ時の旅客流動も把握可能であると考えられる。

本研究では、これら実績データを活用して、運転整理に資する旅客流動分析を行う手法を検討する。具体的にはまず、ダイヤ乱れ時の運転整理手法と旅客流動との

関係を分析するため、人身事故等のトラブル当日のODデータ、乗車人数データを可視化する手法を考案した。これにより、当日の旅客流動が、ダイヤ乱れが発生していない標準日と比べどの程度変動したのか分析可能である。次に、約1年分のトラブルの概況、実績データを利用し、運転再開前後の各区間の断面通過人数を予測する「旅客流動予測モデル」を重回帰分析により構築した。このモデルでは、説明変数に運転再開前における各区間運転率を採用し、折返運転による輸送力の確保等の運転整理の結果、旅客流動が変化することにも対応可能である。

構築した手法を、実在線区におけるダイヤ乱れ時に適用し、その信頼性を検証した。

2. ダイヤ乱れ時の運転整理と旅客流動

2.1 トラブルの発生とダイヤ乱れ，運転整理

トラブルが発生し運転見合せとなると、運転見合わせから運転再開後しばらくの間まで、ダイヤに乱れが生じる。このような場合、支障時間中に輸送サービスが提供されないこと、運転再開後もダイヤ乱れが収束するまで、列車混雑や所要時間増大により利用者に迷惑をかけることが課題となっている。この利便性低下を極力防ぐため、鉄道事業者では状況に応じ、不通区間の前後で折返運転を実施したり、間隔調整により一部列車への混雑集中を緩和したりするなどの運転整理を実施する。

利用者にとって望ましい運転整理を行うためのポイントは、再開前後の旅客流動の把握、すなわち中断中に再

* 信号・情報技術研究部 運転システム研究室

開を待つ利用者がどの程度いて、再開前後にどの区間にどの程度の列車本数が必要なのか把握することである。例えば、A 駅⇒B 駅の利用者数が圧倒的に多い路線で、それより遠方の C 駅でのトラブルにより不通区間が発生した場合は、支障解除まで全線の運転を中断するより、可能であれば、A 駅⇔B 駅間の折返運転により、一部区間の輸送を確保するのが望ましい。同様に、A 駅⇒D 駅（C 駅より遠方）の利用者が多い場合でも、A 駅⇒D 駅間の移動が他路線により可能で、多くの利用者が他路線へ転移する場合には、再開直後に多くの列車本数を設定するより、必要輸送力を確保した上である程度の本数を運休し、ダイヤの早期回復を図るほうが望ましい。

2.2 ダイヤ乱れ時の旅客流動

ダイヤ乱れ時に利用者がとりうる行動として、支障区間の運転再開を待つ、振替輸送などを利用し他路線へ迂回する、移動そのものを取り止める等が考えられる。このような旅客流動の把握、予測は、現状では指令室の指令員が、現場の乗務員、係員からの報告や、駅ホームのカメラ画像といった限られた情報を参考にしながら、経験的に行っている。その結果、情報を得られない一部の駅や列車の大混雑により、想定外の所要時間増加が起これ、当初予定した運転整理では上手くいかず、ダイヤ回復まで長時間を要したというケースも発生している。適切な運転整理のためには、これら経験的に行っている旅客流動の把握を支援する必要がある。

しかし、ダイヤ乱れ時の旅客流動は、曜日、時間帯、当日の運転状況、列車や駅ホームの混雑度合い、迂回経路の有無等、様々な要因により左右されるため、精度の良い予測は難しい。実際、過去と全く同一の発生箇所、時間帯、支障時間のトラブルが発生することは極めてまれであり、仮に類似事例が過去にある場合でも、係員や乗務員からの案内内容が異なれば、異なる旅客流動となる可能性がある。トラブルの概況、他路線への迂回可能性に加え、これら利用者への案内も考慮する必要がある。

2.3 関連研究

ダイヤ乱れ時の旅客流動を予測する研究として、武藤らは Web アンケート調査を利用し、実際にダイヤ乱れに遭遇した被験者に対し、迂回経路を利用したか、運転再開を待ったかを尋ね、迂回経路、再開待ち経路それぞれの予測所要時間に基づく行動選択モデルを構築した²⁾。筆者らは、この行動モデルを利用し、当日の運転整理ダイヤ、利用者の OD データを用いた列車運行・旅客流動シミュレーションを実施することにより、ダイヤ乱れ時の運転整理案を逐次改良する手法を提案した³⁾。しかし、これらの手法は、Web 調査の対象となった一部の利用者の行動結果をもとに行動モデルを作成し、シミュレー

ションにより推定結果を集約しており、当日の乗車人数等を測定した結果ではない。そのうえ、予測モデルで使用する所要時間は、再開までは全利用者が動けず、再開後には、目的駅まで標準所要時間の定数倍の時間がかかるものとして算出されたもので、折返運転実施の有無等、当日の運転整理内容との対応がとられているわけではない。また明星らは、ダイヤ乱れ時の自動改札機 OD データに着目し、トラブルが発生しなかった場合の OD 利用者数に対する減少率を算出、予め蓄積しておくことで、当日トラブルが起こった場合に、過去の類似する事例での減少率を適用し、OD 利用者数を予測する方式を提案している⁴⁾。しかしこの手法では、特定の OD に関する傾向は判明するものの、運転整理場面で重要となる、区間別の輸送需要が明らかにならず、全面運転再開までに折返運転を行ったほうが良いかどうかの判断や、全面運転再開後にどの程度の列車運休本数が許容されるのか等、具体的な運転整理の判断にそのまま使用するの難しい。

2.4 旅客流動分析手法に求められる要件

以上を踏まえ、ダイヤ乱れ時の旅客流動分析手法に求められる要件として、以下の3点が考えられる。

- ①運転整理の検討に必要な、各区間、時間帯の利用者の流れがわかること
 - ②トラブルの発生時間帯、支障時間長等の概況に加え、他路線による迂回経路有無、案内された運転再開見込時刻の当たり外れ等、迂回経路、旅客案内との関係が分析可能なこと
 - ③当日の運転整理手配内容との対応が明らかなこと
- 本研究では、これらを満たす分析手法を構築する。

3. 実績データと研究のアプローチ

3.1 列車運行に伴い収集される各種実績データ

運行管理システムや車両、自動改札機等の各種機器の更新、IT 化により、近年では、日々の列車運行に伴う様々な実績データが収集、蓄積可能となってきた。実績データの例を下記に示す（図 1）。

①実績運行時刻データ

各列車、各駅の実績到着／発車時刻を記録したデータ。軌道回路の在線実績情報と、指令室の運行管理システムが保持するダイヤ情報により演算され、運行管理システム内に記録される。システム導入範囲内であれば、走行する全列車、全駅の着発時刻情報が取得可能である。

②列車乗車人数データ（応荷重データ）

各列車、区間の乗車人数情報。車両に搭載された応荷重装置により計測された重量をもとに推定され、各駅間で計測の都度、無線通信により地上側で収集、蓄

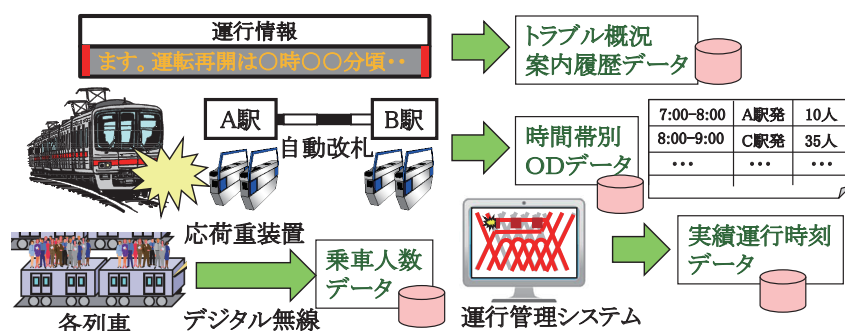


図1 列車運行に伴い収集される各種実績データ

積される。なお、応荷重装置は、乗客数や貨物量の車両積載荷重に応じてブレーキ力を変化させる装置で、荷重の大きさは台車のコイルばねのたわみや空気ばね内部の気圧で検出する。応荷重装置から得られるデータにより利用者全員の総重量が得られ、総重量を平均的な利用者の体重で割り、乗車人数を推定する。

③自動改札機 OD データ

自動改札機での入出場時に記録される、「乗車駅、降車駅、降車駅改札通過時間帯、利用者数」を表すデータ。利用者が保持する乗車券類に記録された改札入場駅情報を読み取り、入場駅、通過時間帯毎に集計することで、自動改札機 OD データが集計可能である。

④トラブルの概況

トラブルの日付、曜日、発生箇所、トラブルの種類、発生時刻、全面運転再開時刻等の情報。

⑤運行情報配信履歴

トラブル発生後、事業者のホームページに掲載された運転再開見込時刻と、それが的中したか否かの情報。

3.2 本研究のアプローチ

本研究では、上記の各種実績データを直接分析し、ダイヤ乱れ時の旅客流動の特徴を抽出する手法を構築する。

まず、ダイヤ乱れ当日1日の実績データを対象に、旅客流動を可視化する手法を構築する。具体的には、列車乗車人数データの可視化手法として、運転整理結果のダイヤ図上の列車スジ色を変化させる方法を提案する。また、自動改札機 OD データの可視化手法として、鉄道ネットワーク上の OD 移動人数を3次的に表示し、表示の基準となる閾値を変化させることで、変動の大きい旅客流動を顕在化させる方法を構築する。

次に、ダイヤ乱れ発生後、収束までの旅客流動を予測するため、ダイヤ乱れ発生日を含む一定期間内（約1年間程度）に取得された各種実績データを用いて、運転中断～運転再開、および再開後における各区間の断面通過人数を予測する旅客流動予測モデルを、重回帰分析により構築する。

本手法の特徴は、実績データの取得を一定期間継続す

ることで、ダイヤ乱れが発生していない標準日についても、十分なサンプル数が取得でき、ダイヤ乱れ発生日と標準日とで旅客流動にどの程度の差異が生ずるのが分析可能なことである。

4. 実績データの可視化

ダイヤ乱れ時の運転整理と旅客流動との関係を分析するために、各実績データの曜日別標準値の算出を、4.1に記載の方法で行ったうえで、①運行時刻データと乗車人数データを用いた可視化、②自動改札機 OD データを用いた可視化の2つを行う。

4.1 曜日別標準値の作成

ダイヤ乱れ当日に測定された乗車人数データ、自動改札機 OD データについて、ダイヤ乱れが発生しなかった場合、標準的にどの程度の値なのかを把握することは、当日の実績値から日常的な変動要素を排除し、ダイヤ乱れによる直接的な影響のみを抽出するために重要である。しかし、同じ列車、区間であっても、利用者数は曜日や天候、季節、数分程度の小規模な遅延等により多少の変動が発生しており、一概に標準値を定義するのは難しい。

そこで本研究では、これらのデータの標準値を、取得期間内の各曜日（祝日除く）における中央値とする。曜日別に標準値を設定したのは、データの基礎分析を行った結果、曜日による旅客流動の差が大きくみられるためである。また、平均値を採用しない理由は、例えばある1日だけ大規模なイベント等が開催され、通常の2倍以上の利用者数が観測された場合には、平均値がそのような異常値に大きく影響されるためである。なお、サンプル数が偶数個の場合には、標準値は中央2値の平均とする。また本研究では、曜日別標準値の作成に、1ヶ月分の実績データを利用した。

4.2 運行時刻、乗車人数データを用いた可視化

当日の運行時刻、乗車人数データを用いた可視化の手順は以下のとおりである。まず、運行時刻データの各列

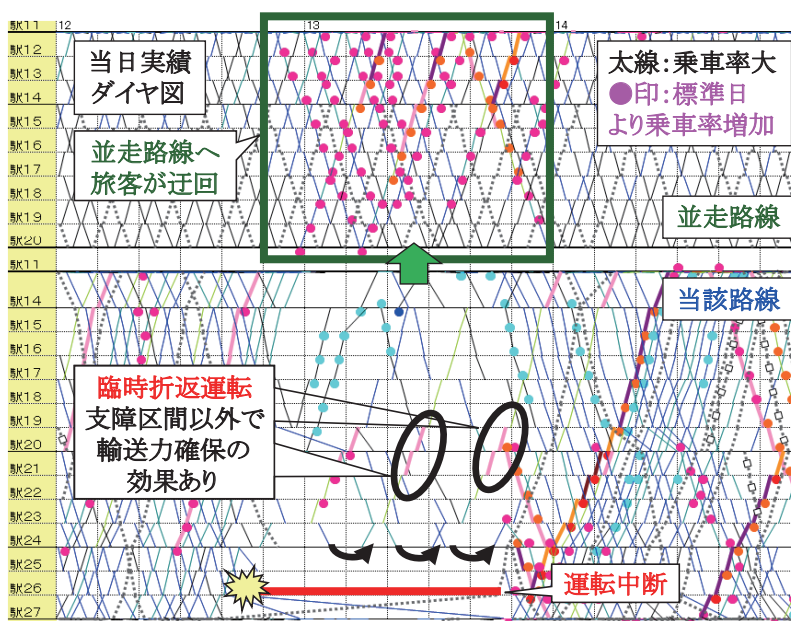


図2 ダイヤ乱れ時の旅客流動可視化例（ダイヤ図の着色）

車、各駅の実績着発時刻に基づき、ダイヤ図上の列車スジの描画位置を指定する。そして、各列車、各区間の列車スジの色、太さを、当日の乗車率に応じて指定する。乗車率によって色を変化させ、乗車率の少ない場合は青色系に、多い場合は赤色系としている。0% から 25% 刻みで配色を変え、200% 以上は純色の「赤」としている。また、100% 以上の列車のスジは太線とした。なおこのとき、一部列車が車両形式の関係上、乗車率の取得が不可能であった。この列車については、灰色の点線で区別し、乗車率不明の列車スジが存在することを表示する。そして最後に、各列車、区間の乗車率と 4.1 節で算出される曜日別の標準乗車率との差分をとり、その値に応じ各列車スジの始点に●印を付加する。●印は曜日別標準乗車率との差が± 20 ポイント以上のスジのみ付与し、増加の場合は赤系で、減少の場合は青系で着色する。

ある通勤路線における、ダイヤ乱れ当日の実績データを可視化した結果を図2に示す。この路線は、駅11～20間では、2路線が並走している。この日は、駅26で人身事故が発生し、駅26を通過する列車運行が約1時間中断した。図の下側のダイヤ図が、トラブル発生の際当該路線であり、上側が並走路線である。まず、運転中断直後から、ダイヤ図上側の列車スジの多くに赤い●印が表示されている。これは、当該路線の運転中断に伴い、並走路線のある駅11～20間の利用者が並走路線へ迂回したためである。次に、当日は再開まである程度の時間を要すると見込まれたため、駅24において駅11方向へ3個列車の折返運転を実施した。その臨時折返列車は、図中下段の黒線の丸で囲い表示されており、特に駅20付近では太線で100%以上の乗車率となっており、一定の利用者が乗車していたことがわかる。このように、実

績データの可視化により、並走路線への転移や、折返運転の効果などを容易に把握可能である。

4.3 自動改札機 OD データを用いた可視化

鉄道ネットワークの時間帯別 OD データを、その値に応じた色分けで3次元的に可視化する。移動人数の表示の基準となる閾値を自在に変化させることで、OD データに内在する旅客流動の特徴を見出すことができる。

鉄道ネットワークを平面で表現し、3次元空間上にこの平面を2つ配置する。一方を乗車駅側、もう一方を降車駅側とみなし、それぞれの駅の位置を図3に示すように、ダイヤ乱れ当日の移動人数を特徴づけた線（以下、リンク）で結ぶ。この特徴づけには、当日の当該 OD の利用者数と 4.1 節で算出される標準値との差分に応じた色分けを使用する。これを3次元空間の様々な角度から視認することで、路線が異なる乗車駅と降車駅組み合わせであっても、移動人数の変化の特徴を容易に見出すことが可能である。また、全ての OD のリンクを表示すると視認性が悪化するため、リンクの表示に閾値を設け、標準値と比べ一定以上の増減が観測された OD を表示対象としたうえで、閾値を必要に応じ調整、変動させることで、注目すべき変動の大きい利用区間を顕在化させる

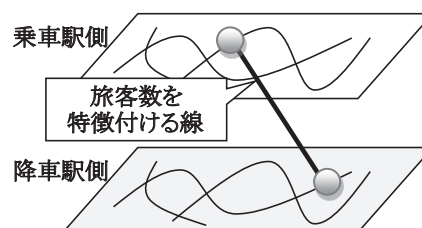


図3 OD データの3次元的な可視化手法

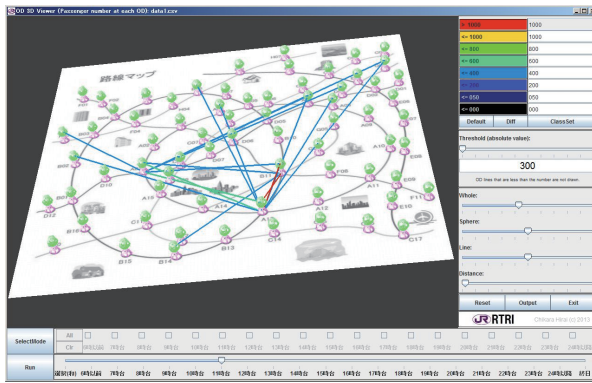


図4 鉄道ネットワークにおけるODデータ可視化のイメージ

ことが可能である。

都市圏鉄道ネットワークにおける可視化のイメージを図4に示す。駅を表現する球を立体的に表示し、人数の閾値や、時間帯等を調整することで、ODデータの全体像を視覚的に確認できる。このような可視化により、例えばある駅で発生した事故が引き起こすダイヤ乱れが、その路線に与える影響、接続されている別路線に与える影響、更にはその影響が波及する時間的な変化についても把握することが可能となる。

5. 旅客流動予測モデル

5.1 目的と対象

次に、実際のトラブル発生直後に、運転再開まで、または再開後の各区間の必要輸送力を把握するために、再開前後の区間別通過人数を定量的に予測する「旅客流動予測モデル」を、過去のダイヤ乱れ時の実績データを利用して構築する。モデル構築には、前章と同様、実績運行時刻データと乗車人数データを収集、利用する。ダイヤ乱れの事例数を確保するため、対象路線での実績データの収集期間を約1年間とした。その間に運転中断を伴う人身事故が発生し、かつ運転中断時刻、再開見込案内内容、再開時刻等のトラブルの概況が漏れなく収集できた、28事例のデータを使用する。

予測対象としては、運転中断～再開まで、および運転中断～再開1時間後までの各区間の断面通過人数の増減率とする。対象を個別の列車の乗員ではなく、運転中断、再開時刻を基準とした一定時間の断面通過人数増減率とするのは、時間帯による本来の需要そのものの変動、差異と、局所的な運転間隔の疎密による影響を排除し、運転整理により充当される列車本数、輸送力が大局的にみて十分か否かを判断するためである。また、これにより、例えば昼間時間帯の予測モデルであれば、トラブル発生が11時のケースでも14時のケースでも、そのデータを

同一の予測モデル構築に利用可能となるなど、モデル構築に必要なダイヤ乱れ件数を確保できるメリットもある。

なお、断面通過人数増減率の算出にあたり、分母となる標準日における断面通過人数が必要となるが、これには4.2節同様、1ヶ月分の実績データを利用し、各曜日、時間帯、区間の断面通過人数の中央値を採用した。

5.2 重回帰分析による予測モデル作成手法

予測モデルの構築には、重回帰分析を利用する。被説明変数を運転中断～再開まで、および運転中断～再開1時間後までの各区間断面通過人数増減率とし、説明変数を①トラブルの概況（発生箇所、支障区間、発生時間帯、不通時間長）、②各区間の特徴（並走路線有無、他社線との接続有無）、③再開見込案内の的中有無（再開後予測のみ）、④運転中断～再開までの当該区間運転率（再開後予測のみ）の4区分、計18個とした（図5）。また、説明変数の選択には、ステップワイズ法を利用した。

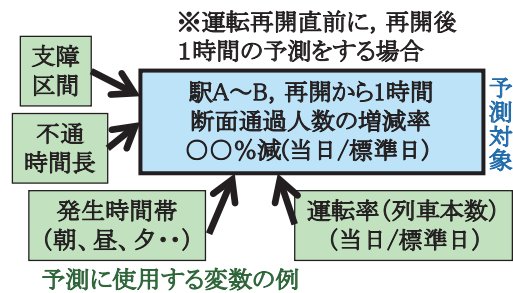


図5 旅客流動予測モデルの作成

5.3 実在線区における予測モデル構築結果

4.2節の可視化を行った路線と同一路線を対象に、旅客流動予測モデルを構築した結果の一部を表1に示す。当該路線上下線の運転中断～運転再開1時間後までの各区間の断面増減率が、駅1～20、駅20～27、駅27～32のそれぞれについて、どのような重回帰式で表されるのかを示している。表中の各項目は、対応する説明変数の偏重回帰係数で、モデルとして選択されない変数には0.00が記載されている。また、説明変数に「D」の表記があるものはダミー変数で、該当する場合には1、しない場合には0をとる。構築した予測モデルの重回帰係数を比較すると、0.76～0.88と、良好な予測結果を示した。

5.4 予測モデルの検証

構築したモデルを新たなダイヤ乱れに適用した場合の妥当性を検証するため、対象路線の実績データのうち、モデル構築に使用しなかったダイヤ乱れ発生日のデータを5事例用意し、実際の断面通過人数と、予測モデルによる断面通過人数がどの程度一致しているのかを比較した。

図6はそのうち2事例の結果を示す。上下線の運転中

表1 構築した旅客流動予測モデル（表中の値は重相関係数，および偏回帰係数）

運転中断～再開1時間後 予測式				支障発生箇所 D			支障時間長 D			再開見込 D		...	中断中 運転率
区間	上下	重相関係数	切片	駅14 以东	駅14 ～20	駅20 ～27	30分 以下	30～ 60分	60～ 90分	外れ 前	外れ 後		
駅1～駅20	下り	0.86	-0.25	0.07	-0.16	-0.07	0.00	-0.12	-0.17	0.00	-0.53	...	0.31
駅20～駅27	下り	0.88	-0.24	0.09	0.00	0.04	0.05	0.00	-0.03	-0.02	-0.18	...	0.31
駅27～駅32	下り	0.82	-0.08	0.00	-0.16	0.00	0.13	0.00	-0.20	-0.11	0.00	...	0.42
駅1～駅20	上り	0.85	-0.39	0.22	-0.08	0.00	-0.07	-0.22	-0.27	0.04	-0.58	...	0.37
駅20～駅27	上り	0.80	0.19	0.07	-0.07	-0.09	0.00	-0.15	-0.17	-0.03	-0.36	...	0.08
駅27～駅32	上り	0.76	0.08	0.00	-0.26	0.00	0.00	0.00	-0.14	-0.11	-0.14	...	0.31

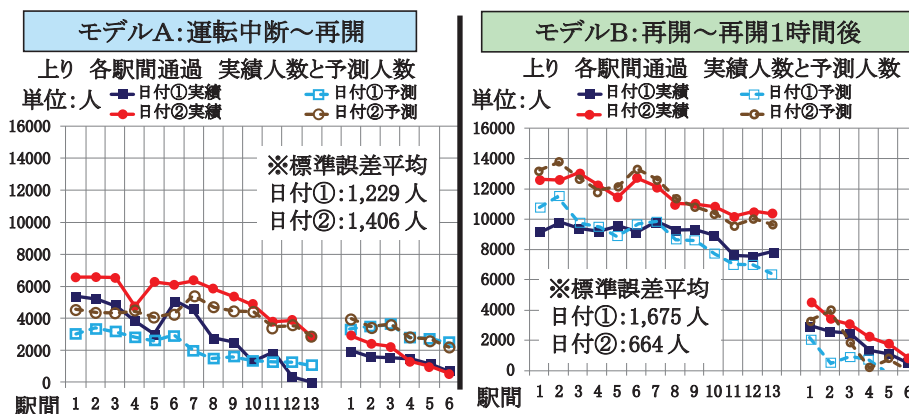


図6 旅客流動予測モデルの妥当性検証

断～再開まで，再開～再開1時間後までの各区間の断面通過人数の実績値と，モデルによる予測値を表す。誤差等の定量的な評価も行った結果，運転再開前後の列車本数を検討する目的では，耐えうる精度であることを確認した。

6. おわりに

ダイヤ乱れ時に適切な運転整理を行うことを目的に，旅客流動を各種実績データを用いて分析する手法を提案した。実績データの可視化手法は，当日の運転整理内容と，各列車の乗車率やOD利用者数の増減との関係を容易に把握可能で，指令室での当日の運転整理手配の事後評価等に活用可能である。また，旅客流動予測モデルは，トラブルの概況，迂回経路だけでなく，再開見込案内情報，運転整理で確保される各区間の列車本数から，各区間の断面通過人数を予測しており，再開前後の輸送力過不足等の検討に活用可能である。

今後の課題として，事例増加による旅客流動予測モデルの検証，他路線への適用等が挙げられる。これらをクリアしたうえで，旅客流動予測結果を活用し，より望ま

しい運転整理の実現に繋げたい。

謝辞

本研究実施にあたり，多大なご助言，ご協力をいただきました東日本旅客鉄道㈱ JR 東日本研究開発センター先端鉄道システム開発センターの皆様へ感謝申し上げます。

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) 武藤雅威：運転再開時における旅客数の予測手法の開発，鉄道総研報告，vol.22，No.6，pp.17-22，2008
- 3) 國松武俊，平井力，村木国満，高場基司：旅客の流動と評価に基づく運転整理案作成アルゴリズム，交通・電気鉄道研究会，2008
- 4) 明星秀一，杉山陽一，松原広：ダイヤ乱れ時の運転再開後の旅客予測手法，鉄道総研報告，vol.27，No.2，pp.29-34，2013