

1721 実績データを活用したダイヤ乱れ時の旅客流動分析手法

正〔電〕 ○國松 武俊 (鉄道総研)

正〔電〕 平井 力 (鉄道総研)

Analysis method of passenger flow under disrupted timetable using recorded data

Taketoshi KUNIMATSU, Railway Technical Research Institute, 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji City

Chikara HIRAI, Railway Technical Research Institute

When an operational disturbance occurs, it is important to reschedule disrupted timetable appropriately, considering passengers' flow, such as how many passengers will pass each section before or after resumption of train operation.

In this research, we use recorded data about actual time of train arrival/departure and number of passengers on trains in each section to estimate passengers flow under disrupted timetable. We first devise a visualization method of these recorded data to understand the relationship between rescheduling arrangements and passengers' flow. We also conduct multiple regression analysis of collected data under timetable disruption occurred in recent one year, and developed estimation model for passengers' flow under timetable disruption.

We test the proposed methods by applying actual operational disturbances, and ensure the reliability or effectiveness of them.

Keywords : timetable disruption, passenger flow, train rescheduling, recorded data, data visualization, multiple regression analysis

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。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、指令室で運転再開までの見通しや線区全体の運転状況を把握しながら、状況に応じて支障区間以外での折返運転を実施したり、運休等で列車間隔が開く場合に運転間隔の調整をしたりして、利用者の利便性低下を防止している。しかし、ダイヤ乱れ時の利用者の動向は、利用者が他の路線へ迂回したり、駅の案内放送等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、指令員が経験に基づき推定、運転整理を行っ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ある程度は把握可能と考えられる。

そこで本研究では、これらの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列車乗車人数の増減との関係を分析するため、実績運行時刻データと乗車人数データを実績ダイヤ図上に可視化する手法を考案した。これにより、当日の列車間隔と乗員の偏りの関係の把握のほか、ある列車の当日の乗車人数が、ダイヤ乱れが発生していない標準日の乗車人数に比べてどの程度増減しているかも判定可能である。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、重回帰式で予測する「旅客流動予測モデル」を構築した。このモデルでは、説明変数の1つとして運転再開前後における各区間の運転本数を採用しており、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、その信頼性と有用性を検証、確認した。

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

人身事故等のトラブルが発生し、発生箇所が一時的に支障し運転見合せとなると、トラブル発生から運転再開後しばらくの間、ダイヤに乱れが生じる。このような場合には、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の間、列車の混雑や所要時間が増大することにより、利用者に迷惑をかけることが課題となっている。このような場合に、利便性低下を極力防ぐため、鉄道事業者では状況に応じた運転整理を行っている。具体的には、不通が長引くと予想される場合には、不通区間の前後で折返運転を実施し輸送を確保したり、運転間隔が不均一で一部列車に混雑が集中する場合には、間隔調整を行い混雑の集中を緩和したりすることなどである。

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として、再開前後の利用者動向、旅客流動の把握がある。これは、運転中断中に再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(輸送力)を設定する必要があるのか、ということである。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 駅間の移動が他社線により可能で、多くの利用者が他社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。このような利用者動向、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り、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利用者動向の把握を支援する必要がある。

しかし、ダイヤ乱れ時における利用者の動向は、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、極めてまれである。またこれらについて、仮に過去に類似する事例がある場合でも、係員や乗務員から利用者へ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⁾。また筆者らは、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。また、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。

一方で、実績データに基づく分析、可視化の研究について、実績運行時刻データを利用した遅延の分析が行われている。武内らは、一定期間の列車運行実績データを統計的に分析する手法を検討し、列車運行実績データ分析システム@plan を作成した⁴⁾。また稲川らは、ダイヤ図上の列車スジを、一定期間内における各列車、区間の遅延量の統計値（平均等）に基づき着色、表記変更することにより、日々の運行実績データを可視化し、遅延の発生、伝播の様子を可視化した⁵⁾。しかし、これらの分析は、いずれも小規模の遅延発生時を対象としており、ダ

イヤ乱れ時のような大規模の遅延発生時にはそのまま適用できない。また、各列車の乗車人数データは分析対象とされておらず、遅延と乗車人数の因果関係はこれらの手法では明らかにならない。

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、他線による迂回経路の有無、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確なこと
- 本研究では、これらを満たす分析手法を構築する。

3. 研究のアプローチと使用するデータ

3.1 本研究のアプローチ

本研究では、ダイヤ乱れ時の旅客流動の分析に、近年収集と、蓄積が進んでいる日々の列車運行に伴う各種実績データを活用する。これらのデータは、ダイヤ乱れ発生日を含む、一定期間内（約1年間程度）に取得されたデータである。

具体的には、まず実績運行時刻、乗車人数データを用い、ダイヤ乱れ発生日1日分を対象に、当日の運転整理結果ダイヤと、それに対する各列車の乗車率との対応を、実績ダイヤ図上に可視化する。このとき、各列車、区間について、仮にダイヤ乱れが発生しなかった場合の乗車率からの増減を分析するため、当日の乗車率と標準日の乗車率との差分をあわせて表示する。

次に、今後のダイヤ乱れ時の旅客流動を予測するため、期間内の各ダイヤ乱れ事例を対象に、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、実績運行時刻、乗車人数データを集約することにより算出する。そして、この再開前後における各区間の断面通過人数が、標準日と比べてどの程度増減したのかを示す増減率を被説明変数にした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、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かが分析可能なことである。また、旅客流動予測モデルについて、運転中断、再開時刻を基準とし、標準日との増減率を予測対象とすることで、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できるなど、モデル構築に必要なダイヤ乱れ件数を確保している。

3.2 収集、使用する実績データ

本研究で使用する実績データを以下に示す。①、②については、ダイヤ乱れ発生日に加え、標準日のデータを作成するため、継続して一定期間のデータを取得する。

①実績運行時刻データ（当日、標準日）

各列車、各駅の着発時刻の実績値。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、記録される。システム導入範囲内であれば、全列車、全駅の着発時刻情報が取得される。

②列車乗車人数データ（当日、標準日）

各列車、区間の乗車人数情報。車両に搭載の応荷重装

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、蓄積される。なお、一部の本システム未搭載の車両については、乗車人数は取得されない。

③トラブルの概況（当日）

トラブルの発生時刻、発生箇所、運転再開時刻情報。

④運行情報配信履歴（当日）

トラブル発生後、事業者のホームページに掲載された、運転見合わせ、再開見込時刻、運転再開等の情報と時刻。

4. 実績データの可視化

4.1 目的と手順

ダイヤ乱れ時の折返運転、間隔調整等の具体的な運転整理手配と、各列車の乗車率との関係を分析するために、実績運行時刻データと乗車人数データを用いた可視化を行う。具体的には、まず、各列車の曜日別標準乗車人数の算出を、下記 4.2 に記載の方法で行う。次に、当日の実績運行時刻データを利用して、各列車、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 4.2 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。

4.2 曜日別標準値の作成

各列車、区間について、ダイヤ乱れが発生しなかった場合、標準的どの程度の乗車率なのかを把握することは、当日の乗車率データから日常変動を排除し、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「標準日の乗車率」を定義するのは難しい。

そこで本研究では、標準日の乗車率を、データ取得期間内の各曜日（祝日除く）における、当該列車、区間の乗車率の「中央値」とする。曜日別に標準値を設定したのは、取得データの基礎分析を行うと、曜日による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 日だけ遅延等で列車間隔が開き、通常の 2 倍以上の乗員が観測される場合などには、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。

4.3 実際のダイヤ乱れに対する可視化例

上記のプロセスに基づき、あるダイヤ乱れ当日の実績データを可視化した結果を Fig.1 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、図中下段の赤点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。

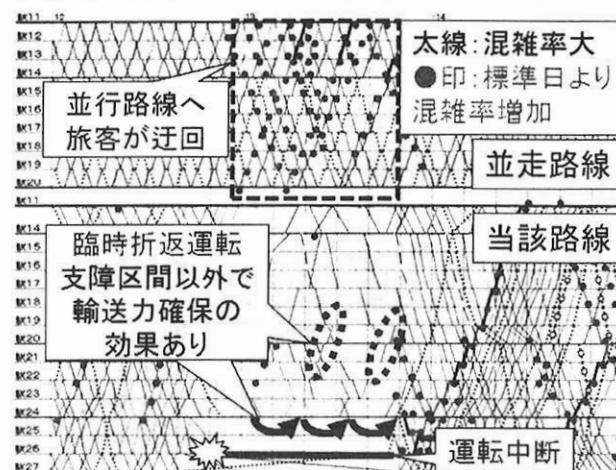


Fig.1 ダイヤ乱れ時の旅客流動可視化例（ダイヤ図の着色）

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。ダイヤ乱れは頻度が少ないため、対象路線での実績データの収集期間を約 1 年間とし、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。

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の断面通過人数の増減率とし、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（並行線区有無、他

社線との接続有無), ③再開見込案内の的中有無, ④当該区間に運転整理で設定される列車本数(対計画ダイヤ比率)の4区分の情報, 計18個とした(Fig.2)。また, 説明変数の選択には, ステップワイズ法を利用した。

5.3 実在線区における予測モデル構築結果

4.3 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 Table.1 に示す。当該路線上下線の運転中断～再開, 再開1時間後までの各区間の断面増減率が, 駅11～20, 駅20～27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, 0.80～0.97と, 良好な予測結果を示した。

5.4 予測モデルの検証

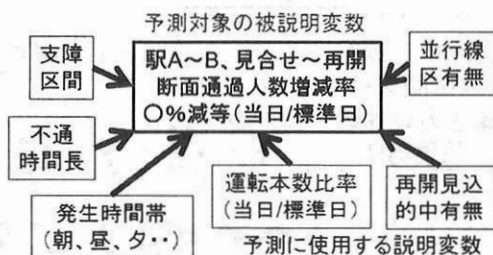


Fig.2 旅客流動予測モデルの作成

次に, 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に, 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。

Fig.3 は上下線の運転中断～再開まで, 駅11～27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。上り駅20→19間において, 実績と予測で約2000人の差が生じた点は, 精査が必要であるが, それ以外の区間は, 多少の差異はあるものの, 概ね通過人数が一致する結果となった。

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

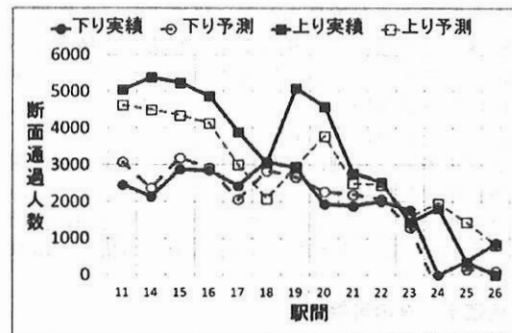


Fig.3 旅客流動予測モデルの妥当性検証

と, 各列車の乗車率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振り返り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株式会社 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にご感謝申し上げます。

参考文献

- 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, 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) 武内陽子, 泉利幸, 富井規雄：列車運行実績分析システム@Plan の作成とその試用例, 第43回鉄道サイバネティクスシンポジウム論文集, 2006。
- 5) 稲川真範, 富井規雄, 牛田貢平：列車運行実績データの可視化, J-Rail2009, 2009。

Table 1 構築した旅客流動予測モデル (表中の値は重回帰係数, および偏回帰係数)

時間帯	区間	上下	重回帰係数R 自由度調整済	(定数項)	当該線区 支障D	並行線区 支障D	駅11～14 支障D	駅14～20 支障D	駅20～27 支障D	早朝 発生D	朝D	昼D	夜D
運転中断 ～ 再開まで	駅11～20	下り	0.97	-0.05	0.00	0.00	0.17	0.16	0.05	0.06	0.00	0.00	0.12
	駅20～27	下り	0.98	-0.04	-0.08	-0.14	0.16	0.28	0.14	0.08	0.10	0.13	0.14
	駅11～20	上り	0.94	-0.07	0.00	-0.10	0.20	0.19	0.08	0.13	0.00	0.08	0.15
	駅20～27	上り	0.94	-0.72	0.00	-0.07	0.07	-0.06	-0.06	-0.11	-0.20	-0.08	0.00
運転中断 ～ 再開1h後	駅11～20	下り	0.86	-0.46	0.11	0.10	0.14	0.00	0.04	-0.17	-0.46	-0.18	-0.13
	駅20～27	下り	0.84	-0.10	0.04	0.00	0.08	-0.09	-0.11	-0.29	-0.36	-0.16	-0.17
	駅11～20	上り	0.88	-0.72	0.00	0.00	0.07	-0.06	-0.04	0.09	-0.11	0.12	0.13
	駅20～27	上り	0.80	-0.01	0.05	0.00	0.07	-0.06	-0.09	-0.30	-0.37	-0.23	-0.20
時間帯	区間	上下	支障30分 以下D	支障30 ～60分D	支障60 ～90分D	見込外れ15 分以上前D	見込外れ15 分以上後D	並行線区 有無D	発側に 他社線D	着側に 他社線D	本数割合 当日/標準		
運転中断 ～ 再開まで	駅11～20	下り	-0.15	-0.18	-0.14	0.06	-0.22	-0.07	-0.03	-0.03			
	駅20～27	下り	0.00	0.00	0.00	0.07	0.22	0.00	0.00	0.00			
	駅11～20	上り	-0.29	-0.28	-0.33	0.07	-0.30	-0.05	0.00	0.00			
	駅20～27	上り	-0.17	-0.12	-0.13	0.07	-0.20	0.00	0.00	0.00			
運転中断 ～ 再開1h後	駅11～20	下り	-0.07	-0.20	-0.27	-0.03	-0.38	-0.04	0.00	0.00	0.69		
	駅20～27	下り	0.00	-0.07	-0.09	-0.04	-0.33	0.00	0.00	0.00	0.24		
	駅11～20	上り	-0.15	-0.19	-0.22	0.00	-0.25	0.00	-0.03	0.00			
	駅20～27	上り	0.00	-0.14	-0.14	-0.02	-0.31	0.00	0.00	0.00	0.21		