

旅客利便性の観点からの 列車折返し設備設置効果の評価手法

國松 武俊* 坂口 隆* 石原 裕介** 寺澤 孝彦*

Evaluation of Facility Improvement in Turn Tracks from the Viewpoints of Service Level for Passengers

Taketoshi KUNIMATSU Takashi SAKAGUCHI

Yusuke ISHIHARA Takahiko TERASAWA

When an operational disturbance occurs, it is often the case that all trains on that line are stopped. It may significantly decrease the transportation service level for passengers, because even passengers who need not go through the blockage section are forced to wait until the cause of the suspension is removed. Deploying additional turn tracks and providing shuttle service can localize the bad effect of such disturbances. In our research, we established a method of estimating the effectiveness of turn tracks from the viewpoints of passengers. We also conducted some case studies, which include experiments for evaluating the effectiveness of additional turn tracks.

キーワード：輸送障害，運転整理，折返し運転，折返し設備，シミュレーション

1. はじめに

近年、複数路線を跨る直通列車の運行が拡充の傾向にあり、乗換を回避し目的地まで行ける点で、利便性が向上されつつある。しかしその一方で、ひとたび人身事故等の輸送障害が発生すると、そのダイヤ乱れの影響は広範囲に及び、輸送障害の発生した路線以外や支障区間を通らない利用者にも迷惑が及ぶ点が課題となっている。

鉄道事業者では、直通運転による利便性を確保しながらも、輸送障害時に折返し運転をするために、途中駅のわたり線や関連設備（以下、折返し設備という）を新設する、輸送障害の発生箇所・時間帯別に折返し運転の方法を予め定め、輸送障害発生時に迅速な運転整理手配が可能ないようにする等の対策がとられている。

しかし、途中駅に折返し設備を新設する場合、新設・維持に相当なコストがかかるため、費用対効果分析を実施し、客観的な数値に基づき効果的な箇所を優先するのが望ましい。このうち、新設・維持費用は工費等から見積もり可能であるが、新設効果は輸送障害時における輸送サービスの向上度合いであるため、定量的な把握が困難である。そのためには、区間別の利用者数だけでなく、設備新設前後における、各利用者の所要時間、待ち時間、混雑度等を考慮する必要がある。

そこで本研究では、これら折返し設備を新設した場合の利便性向上効果を、シミュレーションにより評価する手法を開発した。具体的には、輸送障害時を想定し、折

返し設備新設前後の列車運行、利用者行動をシミュレーションにより詳細に模擬し、利用者の視点で折返し設備を評価するものである。この手法では、輸送障害の発生頻度や、他路線への迂回を含む利用者の詳細な行動を考慮できるという特徴がある。

開発した手法を実在線区に適用し、一部の駅に折返し設備を新設した場合の利便性向上効果を評価し、開発手法の有効性を確認した。

2. 折返し設備の新設とその効果

2.1 輸送障害の発生と折返し設備

輸送障害により一時的に不通区間が発生すると、指令室では、不通区間内に列車が入らないよう、その路線の全列車の運転を見合わせたり、折返し設備のある駅での折返し運転を実施したりする。利用者の立場からすると、全線で運転を見合わせるよりも、折返し運転により運転できる区間は運転するのが望ましい。しかし一方で、折返し運転で一部区間のみを動かすと、不通区間の両端の駅のホームが運転再開を待つ利用者で混雑するという課題や、運転再開後には列車の位置や順序が所定と大きく異なり、その後平常ダイヤに戻すまでの運転整理に長時間を要する、という課題も存在する。

例えば図1の路線の駅6で輸送障害が発生し、運転を見合わせた場合、途中駅に折返し設備が無ければ、この路線の全ての列車は、不通が解消されるまで運行することができない。ここで、もし駅4に折返し設備が存在すれば、駅1～駅4で折返し運転を実施することにより、

* 信号・情報技術研究部 運転システム研究室

** 前 信号・情報技術研究部 運転システム研究室

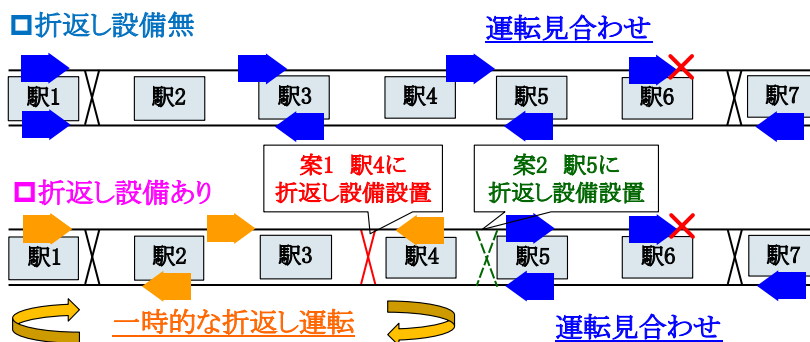


図1 折返し設備の新設とその効果

この区間の輸送は確保できる。ここで、この駅4の折返し設備の価値は、どの程度であろうか。もし仮に、駅4に折返し設備が無かった場合、新設する価値はあるのであろうか。また、新たに1箇所だけ折返し設備を新設する場合、それは駅4、駅5のどちらが望ましいのであろうか。

このように、輸送障害による影響低減を目的に折返し設備の新設を行う場合には、折返し運転による利用者の利便性向上というメリットと、設置・維持コストや不通区間の両端の駅への利用者集中といったデメリットのトレードオフとなるため、適切な検討が必要である。

2.2 従来の評価手法

折返し設備の新設効果の評価手法として、従来から用いられているものとして、新設前後で想定される運転整理案の比較、不通時間帯に不通箇所を通過する利用者数の比較がある。前者は、主にパターンダイヤの路線で、ある不通区間を想定した場合に、運転整理ダイヤが新設前後でどのように変化するのか、比較するものである。この手法により、各列車の動きや列車頻度を把握しながら、折返し運転が実際に可能かどうかを検証することができる。しかし、その折返し運転で何人の利用者が降車駅まで到達可能か、何人が運転再開を待ったのかを把握することはできない。一方で後者は、利用者ODデータを使用して、新設前後において、不通区間、不通時間帯に係る利用者数を比較するものである(図2)。この手法では、新設により救済される利用者数を容易に把握できるメリットがあるが、運転再開後の列車混雑により迷惑を被った利用者や、振替乗車等により他路線へ迂回した利用者の迷惑については考慮されない。また、輸送障害が頻発する区間なのか、滅多に発生しない区間なのか、発生頻度によっても効果が異なるが、その点も考慮されない。

これらの手法の問題点は、折返し設備の評価は、その設備を使用した折返し運転を想定して、実際にその路線を利用する予定であった各利用者の動きを予測し、利用者が体験する所要時間、待ち時間、乗換回数、混雑度等

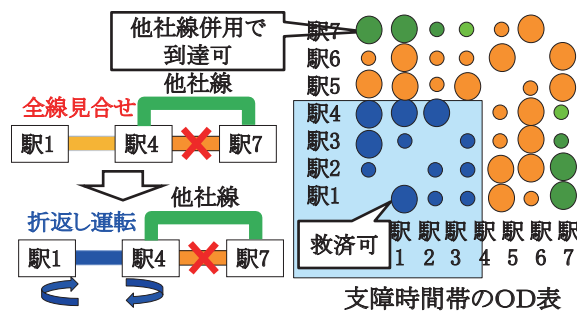


図2 従来の折返し設備の評価手法

の輸送サービスに基づいて行うべきなのに、列車運行の円滑性の観点のみから運転整理案を比較したり、自路線内に全利用者が留まるという前提で、自路線のみを評価対象としたりするところにある。迂回先も含め、各利用者の動きを精緻に推定、評価する手法が必要である。

2.3 関連研究

折返し設備そのものを評価する研究として、小澤ら¹⁾は、複数路線網を対象に、輸送障害発生時刻におけるOD交通需要を推定し、折返し運転時における交通需要を配分することで、複数の折返し設備の新設候補箇所に対する効果を測定している。この手法では、利用者の他路線への迂回行動も考慮されるものの、評価尺度には利用者の平均遅延時間が用いられ、所要時間増以外の乗換回数、混雑度等の増加が考慮されない、輸送障害発生頻度が加味されない、といった課題がある。

また、運転整理案を自動作成する研究として、富井ら²⁾は運転整理実施時の列車運行をPERTにより高速に計算し、長時間停車や接続の解消等、利用者の不満が想定される箇所数を評価尺度とし、シミュレーティッド・アニーリングにより不満箇所数を減らす運転整理案作成アルゴリズムを提案している。しかしこの研究では、評価尺度を利用者の不満箇所数と設定しており、所要時間、乗換回数、混雑度等、利用者の体験する輸送サービスの面からの直接的な評価とはなっていない。

一方で筆者ら³⁾は、列車運行・旅客行動シミュレータを利用し、平常時やダイヤ乱れ時の利用者の動き、体

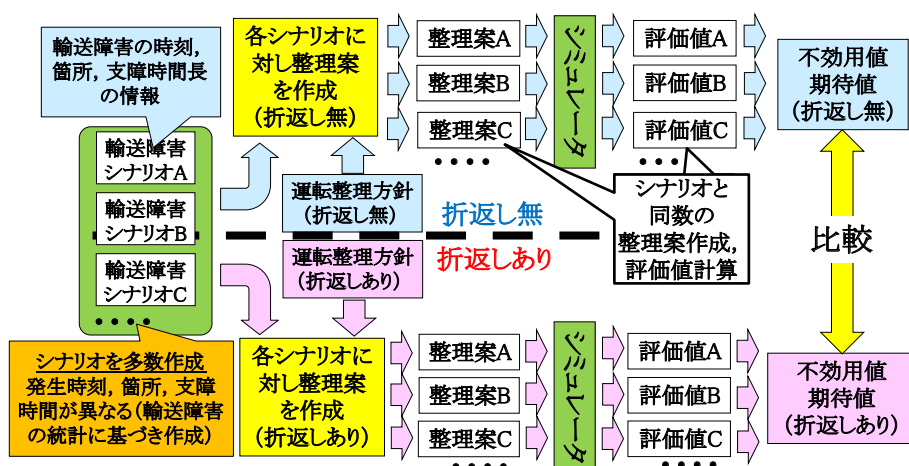


図3 提案する折返し設備の評価方法

験する輸送サービスを詳細に予測し、計画ダイヤや運転整理案を不効用値により評価する手法を提案した。この手法では、他路線への迂回利用者も推定、評価可能である。本研究では、この手法をベースに、折返し設備を定量的に評価する手法を構築する。

3. 提案する折返し設備評価手法

3.1 全体構成

本研究で提案する折返し設備評価手法を図3に示す。本研究では、パターンダイヤの路線、時間帯を対象とする。まず、評価対象の路線・区間について、折返し設備新設前後における運転整理の基本方針を策定する。運転整理の基本方針とは、例えば、駅A～駅B間が不通になった場合、現在快速は駅Dで、普通は駅Cで折返し運転を行っているが、駅Bに折返し設備を新設後は、普通はB駅で折返し運転する、といったものである。次に、基本方針を適用する輸送障害シナリオと、それに対応する運転整理ダイヤを作成する。シナリオは、輸送障害の発生時刻、支障箇所、支障時間帯の情報を含むものを複数作成する。そして、作成した新設前後の運転整理ダイヤに対し、列車運行・旅客行動シミュレータを適用し、その整理案を実施した場合の列車運行、利用者行動を推定する。最後に、推定した利用者行動をもとに、各利用者の不効用値を算出、それを集約して、折返し設備新設前後の評価値を算出・比較する。

3.2 シナリオの自動作成

輸送障害の発生時刻、支障箇所、支障時間帯のシナリオ作成方法は以下のとおりである。まず、過去の輸送障害記録をもとに、時間帯、支障区間別の1日あたりの輸送障害発生確率を算出する。ここで算出した時間帯、確率の情報に基づいて、対応する輸送障害シナリオを確率

的に発生させる。例えば、15分サイクルのパターンダイヤの路線で、1,000日分のシミュレーションを行う場合、10:00～15:00の間に駅A～駅B間で1時間不通になる輸送障害の発生頻度が0.02の場合、シナリオは平均で20日間分作成される。それらは「10:45～11:45、駅A～駅B間」「13:00～14:00、駅A～駅B間」といった形で、発生時刻が対象時間帯内で均等となるよう作成される。同様の情報が、他の区間、時間帯についても作成される。なお、新設前後で生成、適用されるシナリオは同一とする。

3.3 運転整理案ダイヤ、迂回経路情報の自動作成

運転整理案ダイヤの作成手順は、以下のとおりである。まず、新設前後それぞれについて、輸送障害発生箇所に応じ、どの区間を運転休止するのか、「支障発生箇所（区間）、運休区間（駅○～駅△）」の情報を、運転整理方針として定義する。次に、前節で作成した各シナリオに対し、運転整理方針に沿って、列車の部分運休、折返し運転を機械的に適用することで、シミュレーションに必要な運転整理ダイヤデータを自動作成する（図4）。

より詳細な手順は以下のとおりである。まずユーザが発生箇所、不通時間幅を指定する。不通時間幅は、パターンのサイクル時間の整数倍（以下、 α 倍）とする。次に、支障時間帯に不通区間を通る列車（各列車系統で α 本ずつとなる）に対し、各系統に対する部分運休を、運転整理方針を参照し反映させる。すなわち、各系統の列車に対し、運転整理方針で定義した運休区間の開始駅までの運転、および運休区間の終了駅からの別列車の運転に変更する。このとき、当該列車が運休区間の開始駅を通過する時刻が、輸送障害発生時刻よりも早い場合には、部分運休の手配が間に合わないため、部分運休を行わず、運転再開まで駅で運転を中断（抑止）させ、抑止駅から同一系統の α 本後の列車の時刻で運転する。輸送障害発

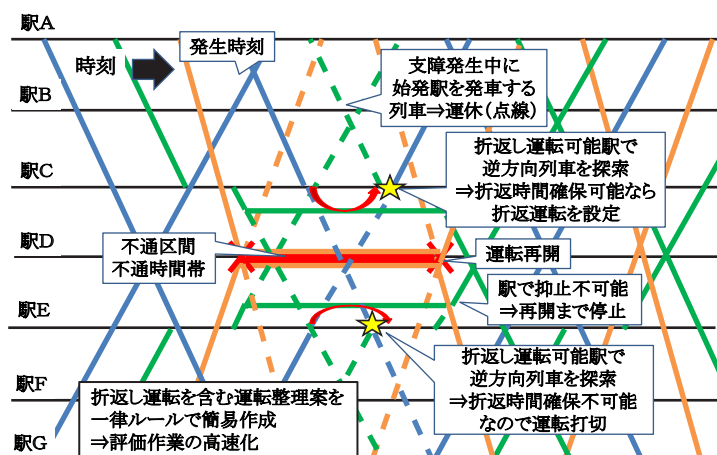


図4 運転整理案ダイヤの自動作成

生時刻に始発駅を発車していない列車については、全区間運休とする。これらの処理を、不通時間帯に不通区間を通る上下線の列車に対して行った後、各系統の運休開始/終了駅、すなわち折返し運転駅において、同一系統への折返し時間の確保が可能か否かの判定を行う。ここで、折返し時間が一定時間以上確保できない場合には、折返し不可能として、折返し先の列車の運転をとりやめる。

一方、迂回経路データについては、対象路線とその周辺の鉄道路線網の標準所要時間情報の入力に基づいて作成する(図5)。各シナリオの発生時刻、支障時間、支障箇所情報から、利用区間毎に対象路線を利用した場合の所要時間、迂回経路を利用した場合の所要時間を算出する。なお、運転再開直後においては、ダイヤ乱れにより通常時よりも所要時間がかかることが考えられるため、対象路線の所要時間を増加させる。具体的には、運転再開直後を1.5倍、ダイヤが回復した時刻を1.0倍とし、その間は倍率が線形に減少するものとする。

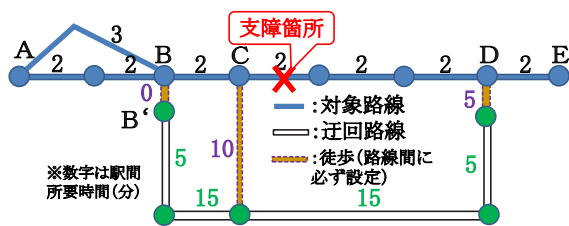


図5 迂回経路データの作成方法

3.4 列車運行・旅客行動シミュレータ

鉄道総研では過去に、自動改札機 OD データ、ダイヤデータをもとに、各利用者の列車選択行動、各列車の混雑度、運行推定時刻(遅延)を推定する「列車運行・旅客行動シミュレータ」を開発した⁴⁾(図6)。このシミュレータでは、当該路線を利用する1人1人の利用者を内部的に生成し、ダイヤデータを参照して、各利用者がど

の列車に乗り、どこで乗換え、いつ目的駅に到達したか等、詳細な利用列車経路の推定を行う。これと同時に、各駅での列車乗降人数を推定し、乗降に必要な時間を計算することにより、利用者の集中による遅延の発生や、遅延発生に伴う利用者の更なる集中といった現象も再現可能である。また、ダイヤ乱れ時を対象に、利用者の他路線への迂回行動を推定する機能があり、各利用者は運転中断、運転再開見込み情報が案内された時刻で迂回判断を行い、運転再開を待った場合と迂回した場合との予想所要時間に基づき、他路線へ迂回するか否かを決定する⁵⁾。

本研究では、3.2、3.3節で自動生成された各シナリオ、折返し設備の有無、運転整理案ダイヤ、迂回経路情報に基づき、列車運行・旅客行動シミュレーションを行うことで、迂回行動を含む各利用者の詳細な行動推定結果を出力する。

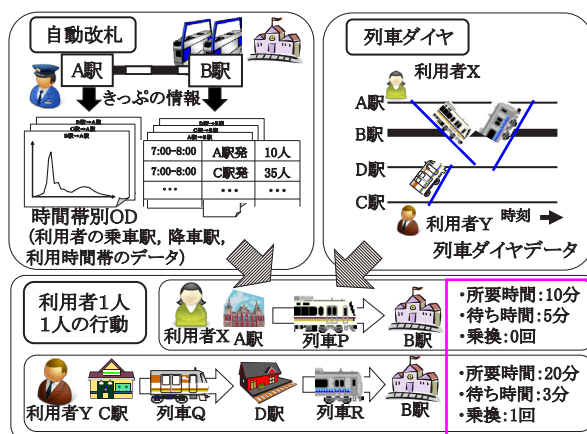


図6 列車運行・旅客行動シミュレータ

3.5 不効用値総和の期待値による評価

前節で各シナリオ、折返し設備の条件に対して出力された、各利用者の詳細な行動履歴について、不効用値を計算し、その運転整理案における各利用者の不便度を算

出する。不効用値は、利用者の鉄道利用による所要時間、待ち時間、乗換回数、混雑度の不便度合いを、所要時間増による損失（秒）に換算したものである。なお、迂回経路を選択した利用者については、迂回経路の徒歩時間、所要時間、乗換等も加味して行う。不効用値の計算式を以下に示す⁶⁾。

$$Disutil = time + 2 \times wait + 600 \times trans + \sum (ride_time \times cong_formula) \quad (1)$$

※各変数の内容は以下のとおり

- Disutil: 利用者の不効用値
- time: 乗車駅出現～降車駅到着までの時間（秒）
- wait: 乗車駅や乗換駅での列車待ち時間の合計（秒）
- trans: 乗換回数（回）
- ride_time: 列車の隣接駅間走行時分（秒）
- cong_formula: 混雑度に応じて以下の式を適用

※ congestion: 混雑率（定員に対する割合）

①混雑度 1.0 未満の場合

$$cong_formula = 0.0270 \times congestion$$

②混雑度 1.0 以上 1.5 未満の場合

$$cong_formula = 0.0828 \times congestion - 0.0558$$

③混雑度 1.5 以上 2.0 未満の場合

$$cong_formula = 0.179 \times congestion - 0.200$$

④混雑度 2.0 以上 2.5 未満の場合

$$cong_formula = 0.690 \times congestion - 1.22$$

⑤混雑度 2.5 以上の場合

$$cong_formula = 1.15 \times congestion - 2.37$$

算出結果の利用者不効用値を、各シナリオ、折返し設備の新設前後それぞれに対して、全利用者分合計することで、そのシナリオ、設備条件に対する評価値とする。

この評価プロセスを、作成された全輸送障害シナリオ、および平常時の列車運行に対し適用する。その結果を、各シナリオの適用回数、平常運行日の回数で加重平均し、折返し設備の新設前後それぞれについて、1日あたりの利用者不効用値合計の期待値を算出する。この期待値の差分が、折返し設備新設による輸送サービス向上度合いの、1日あたり平均値と考える。

算出される値は、各利用者の所要時間、待ち時間、乗換回数、混雑度から計算された不効用値を集約したものであり、利用者視点の評価尺度であるといえる。また、列車運行・旅客行動シミュレータの中で、他路線への迂回をあわせて推定しており、他路線への利用者の流出による影響も加味されている。さらに、過去の輸送障害の統計情報を利用し、発生時刻、支障時間など様々な輸送障害を想定したシナリオを確率的に作成しており、過去の輸送障害発生頻度を加味した評価となっている。

4. 実在路線への適用

4.1 路線の概要と評価対象の新設計画

対象路線の路線図と、評価対象の折返し設備新設計画を図7に示す。折返し設備の新設前は、駅Dで輸送障害が発生した場合、準急は駅A、駅Iで折返し運転、各駅停車は駅Bで折返し運転となり、駅B～駅Iの間は、不通が解消されるまでの間、列車運行を停止せざるを得なかった。新設計画では、駅E、駅Fに折返し設備を新設し、準急は駅Fで、各駅停車は駅Eで折返すことにより、不通区間を駅B～駅E間に短縮させる。これにより、駅K→駅Aの利用者は、新設前は駅Iまでしか到達できず、運転再開を待つしかなかったが、新設後は駅Fまで当該路線を利用し、駅Fで並走他社線へ乗り換えることにより、駅Aに到達できる。これらの定量的効果について、パターンダイヤの時間帯（10～15時）を対象に算定を行った。

なお、この新設設備を利用し、図7に示す折返し運転が可能なのは、駅A～E間で輸送障害が発生した場合である。そこで、過去に昼間時間帯（10～15時）に当該区間で発生した輸送障害事例を調査したところ、不通時間長が30～90分の事例が3年間で28件あった。これは1日あたりの発生割合で約2.55%に相当するため、この確率で輸送障害が発生するようシナリオを設定し、支障時刻は10:00～15:00の間の15分刻みでランダムに設定した。また、本研究で評価対象とした利用者ODは、この路線の乗車駅で10:00～15:00の間に出現する216,181人分である。

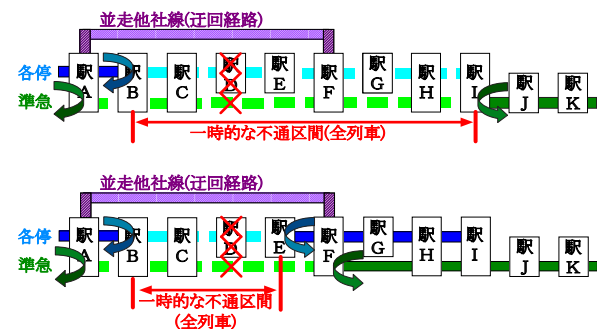


図7 評価対象路線

4.2 評価結果と考察

評価結果を表1に示す。2.55%の輸送障害発生確率を想定した場合、1,000日分の列車運行では、974日が平常運行、残り26日で輸送障害が発生する結果となった。26日間の輸送障害発生時刻は、2列目に記載のとおりであり、それによる各シナリオの不効用値計算結果は右のとおりである。

全体の加重平均でみた場合、折返し設備新設前（折返し無）と新設後（折返しあり）で、不効用値の差分が

特集：輸送計画・情報技術

864,572 となった。したがって、駅 E、駅 F へ折返し設備を新設した場合の効果は、1 日 1 人あたりの期待値で、各利用者の所要時間が約 4 秒短縮される効果と同等であるといえる。

表 1 評価結果 (1)

日数	支障発生時刻	不効用値合計 (216,181 人分)		
		折返し無	折返しあり	差分
974	平常運転	364,959,980	364,976,633	
1	10:28	454,566,067	409,043,806	45,522,261
2	10:58	458,018,144	411,581,088	46,437,056
1	11:13	459,968,708	414,645,167	45,323,541
1	11:43	456,024,055	415,936,685	40,087,370
4	11:58	453,507,620	413,425,772	40,081,848
1	12:13	455,628,928	415,175,666	40,453,262
1	12:28	450,252,887	410,500,783	39,752,104
4	12:43	453,428,749	413,497,874	39,930,875
2	13:13	451,358,257	413,181,594	38,176,663
2	13:43	447,230,718	411,812,258	35,418,460
1	13:58	442,433,188	408,621,536	33,811,652
3	14:28	415,506,838	395,954,892	19,551,946
2	14:43	396,726,027	389,032,488	7,693,539
1	14:58	377,850,285	376,166,355	1,683,930
1000	加重平均	366,948,677	366,084,105	864,572

4.3 複数の折返し設備新設案の比較評価

次に、同じ路線の別の駅 (図 7 の路線図外) で計画されている折返し設備新設計画を対象に、同様の評価を行った。どちらの新設計画のほうが、利用者からみて効果的か比較することが目的である。

評価結果を表 2 に示す。全体の加重平均でみた場合、新設前 (折返し無) と新設後 (折返しあり) で不効用値の差分が 106,201 となった。これは、前節の評価結果 864,572 に比べると十分少なく、この計画よりも駅 E、駅 F に設置する計画のほうが、利用者にとって望ましいことがわかる。このように、複数の折返し設備新設計画を比較評価することにより、どの計画を優先すべきか、どこに折返し設備を設置するのが効果的か、定量的な検討が事前に可能である。

表 2 評価結果 (2)

日数	支障発生時刻	不効用値合計 (214,937 人分)		
		折返し無	折返しあり	差分
986	平常運転	363,823,275	363,842,042	
1	10:25	410,546,075	401,095,696	9,450,379
1	10:40	407,677,028	397,508,365	10,168,663
1	11:25	414,101,598	404,170,195	9,931,403
2	11:40	409,203,595	399,350,120	9,853,475
2	12:40	407,390,590	397,457,998	9,932,592
2	12:55	410,558,267	400,680,755	9,877,512
2	13:10	407,422,227	397,662,722	9,759,505
1	13:25	409,896,080	400,312,436	9,583,644
1	14:25	397,475,476	393,032,541	4,442,935
1	14:40	383,958,067	381,676,057	2,282,010
1000	加重平均	364,422,553	364,316,352	106,201

5. おわりに

輸送障害時における折返し運転実施のための折返し設備について、その新設効果を利用者の利便性の観点から定量的に評価する手法を構築した。提案手法は、新設前後における運転整理ダイヤや計画ダイヤを明示的に考慮し、各利用者の利便性を推定、それを集約した詳細な評価を行うという特徴がある。また、実在路線に適用し、新設効果が定量的に測定可能なことを確認した。

今後の課題として、パターンダイヤでない路線、時間帯における適用、想定する運転整理案作成手法の高度化が挙げられる。これらに取り組み、設備投資判断に資する評価システムとして、ブラッシュアップを図っていきたい。

文 献

- 1) 小澤勇紀：鉄道輸送障害時の旅客流動を考慮した運転整理案，中央大学大学院理工学研究科修士論文，2009
- 2) 富井規雄，田代善昭，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，情報処理学会研究報告 知能と複雑系 2003-ICS-121，2003
- 3) 國松武俊，平井力，高場基司，村木国満：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，電気学会交通・電気鉄道研究会，2008
- 4) 國松武俊，平井力，富井規雄：マイクロシミュレーションを用いた利用者の視点による列車ダイヤ評価手法，電気学会論文誌 D，No.130，Vol.4，2010
- 5) 武藤藤威：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
- 6) 運輸政策研究機構：鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル 2005，2005