

突発的な運行障害時における旅客の行動変化を 考慮した需要分析システムの構築

山下 良久¹・山下 守人²・石野 朝哉³・小田 千尋⁴・千田 雪子⁵

¹正会員 社会システム株式会社 都市・地域交通グループ (〒150-0013 東京都渋谷区恵比寿1-20-22)
E-mail:yamashita@crp.co.jp

²正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 計画部 調査課

³非会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 東京支社 計画部 調査第一課

^{4,5}非会員 社会システム株式会社 IT推進グループ

近年、都市鉄道において人身事故や車両故障等を原因とする突発的な運行障害により、列車の遅延や運休が生じる状況が頻発している。このような問題への対応策を検討する際に、運行障害時の旅客流動の変化を分析できる需要分析システムが有効なツールとなる。障害発生時の旅客行動については、詳細な実績データが存在しないことから、経路変更等を精緻に再現することは困難であるが、ある一定の仮定を置いたシミュレーションによっても、対応策を検討する上での有用な情報を提供できるものと考えられる。

本研究は、突発的な運行障害が発生した場合の旅客の経路変更を、一定の仮定を置いた上で分析する需要分析システムを構築し、その有用性を検証するものである。

Key Words : railway passenger flow analysis system, railway service accident occur, resilience

1. はじめに

我が国の大都市圏における鉄道路線の評価は、「快適性(混雑)」「速達性」「低廉性」「シームレス性(乗換回数)」等の観点から評価がなされてきた。

しかしながら、東日本大震災を契機としてインフラの「強靱性」に対する社会的関心がこれまで以上に高まってきたことから、都市鉄道においてもそのような観点からの評価が必要と考えられる。特に東京圏における都市鉄道の路線評価に当たっては、人身事故や車両故障といった突発的な障害が日常的に発生している状況を踏まえると、震災等の災害時だけでなく、突発的な障害も含めて鉄道路線が発揮するパフォーマンスを評価することが必要であろう。

このような問題意識から、本研究は、特に突発的に障害が発生し、1時間程度で通常運行に復旧するといった状況下での鉄道路線のパフォーマンスを評価する需要分析システムの構築を目的としている。本稿では、東京圏にある郊外から東京都心に向かう放射上路線を分析対象路線として取り上げ、障害発生箇所と発生時刻を変化させた場合に、周辺路線や乗換駅における混雑や乗降客数等がどのように変化し、その変化により鉄道利用者の利便性が通常時と比べてどの程度低下するのかを定量的に分

析する。このような分析を通じて、システムの有用性と技術的課題を明らかにする。

2. 需要分析システムの概要

(1) 鉄道旅客の選択行動

突発的な輸送障害等により通常時に利用している鉄道路線において運休等が発生した場合、その影響を受ける旅客は、表-1に示した旅客のうち、「出発地を障害発生前に出発し、障害発生時に障害区間手前を通過中である旅客(タイプ2)」、「障害発生後(復旧前)に出発地を出発する旅客(タイプ3)」、「障害発生後(復旧後)に出発地を出発する旅客(タイプ4)」の3つのタイプである。障害路線が復旧した後に出発する旅客(タイプ4)が影響を受けるのは、復旧前に生じた旅客の経路変更により、路線の混雑状況が通常時と異なるためであり、復旧後通常時と同程度の混雑状況に戻るまで影響を受けるものと考えられる。

障害に遭遇する旅客の選択行動は、通常時とは異なる選択基準で行われると想像される。例えば、障害が発生し運休路線が生じた場合、その周辺にある運行路線の混雑率は通常時よりも高くなる。通常時には混雑を避けるような経路選択をしていても、障害による運休路線が発

表-1 運行障害等の影響を受ける旅客の整理

	旅客タイプ		障害による影響の有無
	出発地を出発する時刻	障害発生時の通過位置	
1	障害発生前	運休区間は既に通過	無
2		運休区間手前	有
3	障害発生後(復旧前)	—	有
4	障害発生後(復旧後)	—	有

表-2 本需要分析システムの前提条件

項目	前提条件
出発行動	障害が発生することによる、外出のとりやめや出発時刻の変更は生じない。
交通機関選択行動	通常時と同じ交通機関を利用する(通常時と鉄道利用総交通量は変わらない)。
鉄道経路選択行動	通常時の鉄道経路選択基準に基づき行動する。

生している状況下ではある程度の混雑を受け入れた選択行動をとることが考えられる。また、利用する交通機関を変更することや、外出をとりやめたり出発時刻を遅らせる等の行動変化も考えられる。

しかしながら、運行障害時における旅客行動を調査した実績データが存在しないため、障害時の旅客の選択行動基準を捉えることが現時点では困難である。そのため、本システムでは、鉄道旅客の選択行動は、通常時と同じ選択基準で行われると仮定し、表-2に示す前提条件を設定する。

(2) 需要分析システムの構成

a) 計算フロー

上記の前提条件を踏まえ、本需要分析システムの計算フローを図-1に示す。本システムから出力される主なアウトプットは、時間帯別駅間断面交通量・混雑率、時間帯別駅別乗降人員、出発時間帯別一般化費用である。計算フローにおける、各段階で使用するデータ、計算方法を表-3に整理する。

b) 分析対象路線

本研究では、運休となる時間帯や区間の違いによる周辺路線への影響を分析しシステムの有用性や技術的課題を明らかにすることを目的としていることから、分析対象路線としては、輸送需要が大きく、長距離路線で途中に複数の乗換駅を有している路線が適当と考えられる。そのため、東京圏の西南部方面から東京都心に向かう通勤通学輸送を担う放射状の長距離路線であり、途中に複数の乗換駅を有する小田急小田原線を分析対象路線として設定する。また、運休区間は、折返し施設の位置を勘案し、「町田駅～向ヶ丘遊園駅」、「経堂駅～新宿駅」を設定する。

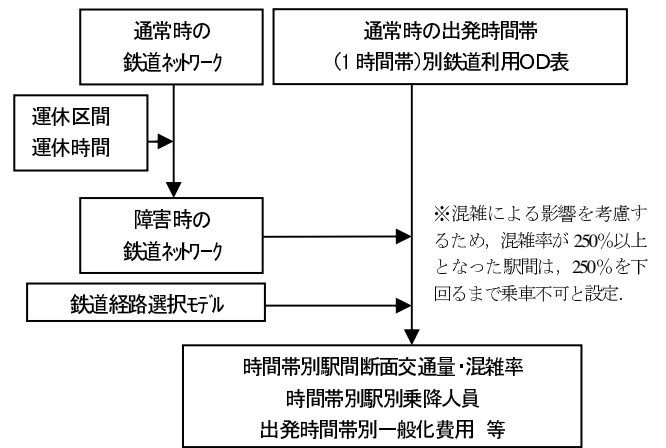


図-1 需要分析システムにおける計算フロー

表-3 各計算段階で使用されるデータ、計算方法等

項目	使用するデータ 計算方法等
通常時の出発時間帯別鉄道利用OD表	<ul style="list-style-type: none"> まず、通常時の終日全手段OD表を作成する。通勤・通学目的は平成22年国勢調査より、私事・業務目的は平成20年東京都都市圏パーソナリティップ（以下H20PT）より求め、合算し作成。 上記で作成された終日全手段OD表に、H20PTにおけるゾーン別発生時刻分布を乗じ、出発時間帯別OD表を作成。なお、時間帯は1時間単位とする。 OD表を鉄道ネットワークに配分する際には、各時間帯のOD交通量は、各時間の30分に発生するものとして配分計算を行う（例：7時台OD表における交通量は7：30に出発）
通常時の鉄道ネットワーク	<ul style="list-style-type: none"> 平成22年時点で開業している路線を設定。 始発～10時台までの1時間帯ごとに、所要時間、運行本数、運賃を、平成22年10月時刻表より設定。 各駅間の通常時の混雑率は、平成23年版都市交通年報、平成17年大都市交通年報に基づき設定。
運休区間	<ul style="list-style-type: none"> 障害発生路線：小田急小田原線 運休区間：以下の2区間を設定。 ①町田駅～向ヶ丘遊園駅 ②経堂駅～新宿駅
運休時間	<ul style="list-style-type: none"> 上記区間が運休する時間帯を3ケース設定。 ①6：00～6：59（7：00から通常運行） ②7：00～7：59（8：00から通常運行） ③8：00～8：59（9：00から通常運行）
障害時の鉄道ネットワーク	<ul style="list-style-type: none"> 通常時の鉄道ネットワークをもとに、上記で設定した時間帯において運休区間を通行不可とする。 車両内が混雑し乗車出来ない状況を考慮するため混雑率が250%以上となった区間は、250%を下回る時間帯まで乗車不可と設定。 混雑による遅延の発生や駅構内移動速度の低下は本分析では考慮しない。
鉄道経路選択モデル	<ul style="list-style-type: none"> 平成17年大都市交通年報より推定。 モデル構造は、構造化ポジットモデル（ポジット構造、効用関数のパラメータ等は巻末付録参照）

c) ケース設定

先述の運休区間、運休時間帯の組み合わせより、本稿で行う分析ケースは表4に示す6ケースである。

3. 分析結果

(1) 現況再現性の検証

需要分析システムの推計精度を検証するため、各路線の主要区間におけるピーク1時間通過人員について、推計値と都市交通年報における公表値の比較を行う。

表5には、分析対象路線である小田急小田原線およびその周辺路線のピーク1時間通過人員を比較した結果を示す。なお、実績値における各駅間のピーク時間帯が8時台を含んでいることから、推計値には8:00-8:59の駅間断面交通量を掲載している。これを見ると小田原線が過大、田園都市線が過小となっており、この2路線間の需要の配分に若干の課題があることが見て取れる。この需要の偏りについては今後の課題とし、本稿では、この現況再現性をもって、障害時の旅客流動の変化について分析を行うこととする。

(2) 障害発生ケースにおける分析結果

a) 駅間混雑率および乗換旅客数の変化

ここでは、町田駅～向ヶ丘遊園駅間、経堂駅～新宿駅間それぞれが、7:00～7:59に運休となったケース2とケース5を取り上げ、障害発生による旅客流動の変化について考察する。

図3、図4は、ケース2、5それぞれにおける7時台の駅間混雑率について、通常時と障害時の混雑率を比較し、その差が25pt以上あった区間および方向を示すとともに、通常時に比べ乗換旅客数が1.5倍以上となった乗換駅を示したものである。また、図2には乗換旅客数を示す。

ケース2に着目すると、町田～向ヶ丘遊園間が運休となったことで、旅客がJR横浜線や相鉄線に多く転移したことが見て取れる。JR横浜線に転移した旅客は、橋本駅や長津田駅から他線に乗換ようとするため、これらの駅における乗換人数が通常時の1.5倍以上になっており、駅構内で非常に激しい混雑が生じているものと推察される。また、通常時、新百合ヶ丘駅から小田原線を利用していた旅客が、小田急多摩線に転移し混雑率が250%に達している。さらに、小田急小田原線の成城学園前付近で新宿方面の混雑率が250%に達している。これは、通常時は郊外方面に乗車している旅客が、向ヶ丘遊園駅から南側が利用できないため、新宿方面に出て別の経路で目的地に向かおうとするためである。

一方、ケース5に着目すると、まず、町田駅からJR横浜線に転移する旅客や、相鉄線に転移する旅客がケース2よりも少なくなっているのが見て取れる。その結果、

表4 ケース設定

Case	運休区間	運休時間帯
1	町田駅～向ヶ丘遊園駅	6:00～6:59 (7:00から通常運行)
2		7:00～7:59 (8:00から通常運行)
3		8:00～8:59 (9:00から通常運行)
4	経堂駅～新宿駅	6:00～6:59 (7:00から通常運行)
5		7:00～7:59 (8:00から通常運行)
6		8:00～8:59 (9:00から通常運行)

表5 現況再現結果

路線名	主要区間	実績値	推計値	推計/実績
小田原線	世田谷代田→下北沢	71,445 (7:47-8:49)	87,357	1.22
京王線	下高井戸→明大前	70,146 (7:40-8:40)	65,655	0.94
田園都市線	池尻大橋→渋谷	79,819 (7:50-8:50)	58,794	0.74
横浜線	小机→新横浜	38,500 (7:26-8:23)	37,635	0.98
南武線	武蔵中原→武蔵小杉	39,200 (7:30-8:30)	37,536	0.96

実績値：平成23年版都市交通年報（平成21年度実績値）

小田急小田原線を利用し登戸駅まで行ってしまいう旅客が増えることから、登戸駅による負荷が非常に大きくなっている。通常時と比較すると7時台における登戸駅の乗換旅客数は、約1.7万人も増加している。小田急小田原線からJR南武線に向かう通路等は、相当激しい混雑が発生するものと考えられる。また、登戸駅から南武線への乗換人数が増加することで、南武線の混雑が激しくなり、混雑率が250%に達している。さらに、小田急小田原線の成城学園前付近では、ケース2で見られたものと逆の流動変化が生じている。すなわち、通常時は経堂駅から都心方面に向かっていた旅客が、登戸駅に出て南武線を利用し別の経路で目的地に向かおうとする経路に転移している。このような変化が登戸駅における混雑に一層の負荷をかけている。一方、通常時に経堂駅もしくは豪徳寺駅から小田急小田原線を利用して新宿方面に向かっていた旅客の多くが、東急世田谷線を利用し三軒茶屋駅から田園都市線で渋谷駅に向かう経路に転移するため、東急世田谷線において非常に激しい混雑が生じている。

混雑状況を比較すると、7時台では経堂駅～新宿駅が運休となった場合の方が鉄道ネットワークのパフォーマンス低下が大きいものと推察される。

b) 一般化費用の変化

ケース1～6における通常時と障害時それぞれについて、各旅客の出発地から目的地までの一般化費用を計算し、その差を取ることで、障害発生箇所、発生時間の違いにより、一般化費用の増加の程度について分析を行う。

表-6は、各ケースについて障害時と通常時の一般化費用の差を取ったものである。これによると、最も一般化費用の増加が大きいのはケース6となっている。すなわち、今回設定した条件の中では、経堂駅～新宿駅間が8:00時台に運休した場合が、最も鉄道ネットワークのパフォーマンスが低下する結果となっている。本分析から明らかになったように、障害時においてもネットワークのパフォーマンスをできるだけ維持するためには、環状路線が機能し続けることが重要である。今回のケース5では、JR横浜線に余力が残っている状況でありながら、多くの旅客が小田急小田原線で都心方向に向かって移動したことが、登戸駅の負荷を高め、それが南武線の混雑につながった。そのため、都心側で障害が発生した場合、郊外の環状路線の乗換駅において、環状路線に旅客を誘導し、内側にある環状路線に大きな負荷がかからないようにすることが重要である。

なお、本分析では駅における施設容量を考慮できていないため、駅構内の混雑状況を定量的に評価できていないが、登戸駅や溝の口駅等では、駅構内の混雑により、駅に入場できず、駅前広場等まで旅客の滞留が発生するような旅客数の増加になっているものと考えられる。

4. おわりに

本研究は、都市鉄道における突発的な輸送障害時の旅客流動の変化を分析する需要分析システムを構築し、ケーススタディを行うことで、その有用性や技術的課題の把握を行うことを目的とするものである。

後述するようにいくつかの技術的課題はあるものの、本分析を通して、障害時においても鉄道ネットワークのパフォーマンスをできるだけ維持するために必要な施策等が把握できる等、システムとしての有用性は確認できたと考えられる。

技術的課題としては、小田急小田原線と東急田園都市線において需要の偏りが見られる等、現況再現性に課題

があることから、この改善を行っていく必要がある。また、現段階では、駅での混雑による駅での乗換時間の増大や、車両内やホーム上の混雑による列車遅延の発生等を考慮できていないことから、これらを混雑の程度にあわせて考慮できる方法を検討することが必要である。

なお、本研究は、(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部における「都市圏における鉄道路線の評価指標に関する調査」の一部を筆者らがとりまとめたものである。

表-6 各ケースにおける一般化費用の増加量

Case	運休区間	運休時間	一般化費用の増加 (億円/日)
1	町田駅～ 向ヶ丘遊園駅	6:00-6:59	1.2
2		7:00-7:59	4.6
3		8:00-8:59	5.3
4	経堂駅～ 新宿駅	6:00-6:59	1.1
5		7:00-7:59	5.7
6		8:00-8:59	9.1

参考文献

- 1) 屋井鉄雄, 中川隆広, 石塚順一: シミュレーション法による構造化プロビットモデルの推定特性, 土木学会論文集 No.604/IV-41, pp.11-21, 1998.
- 2) 運輸省: 東京圏における高速鉄道を中心とする交通網の整備に関する基本計画策定に向けて調査, 2000.

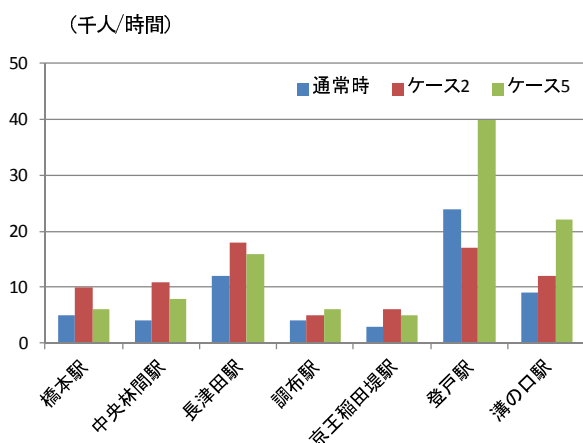


図-2 乗換駅における乗換旅客数 (7時台)

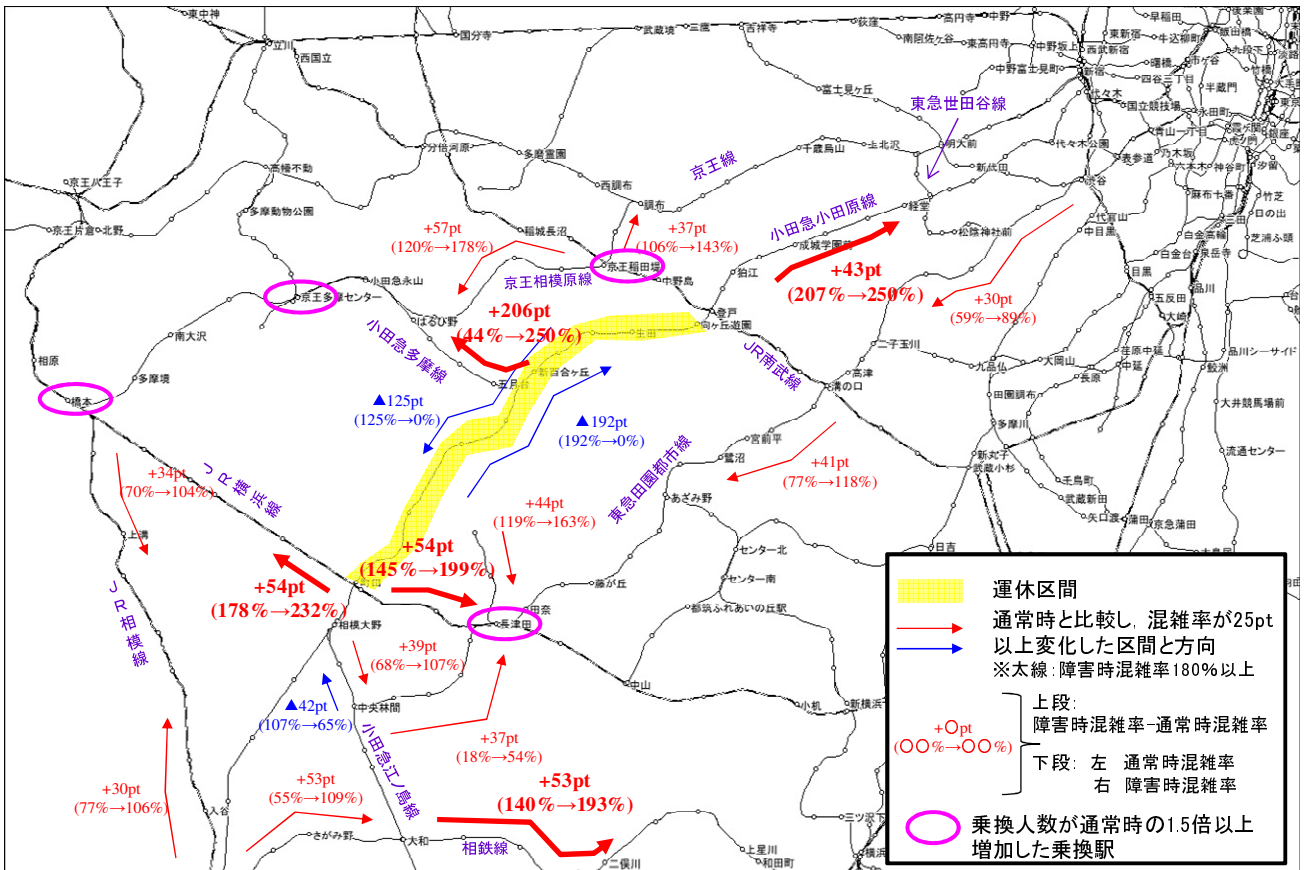


図3 ケース 2における通常時と障害時の駅間混雑率の変化 (運休時間 7:00~7:59, 運休区間: 町田駅~向ヶ丘遊園駅)

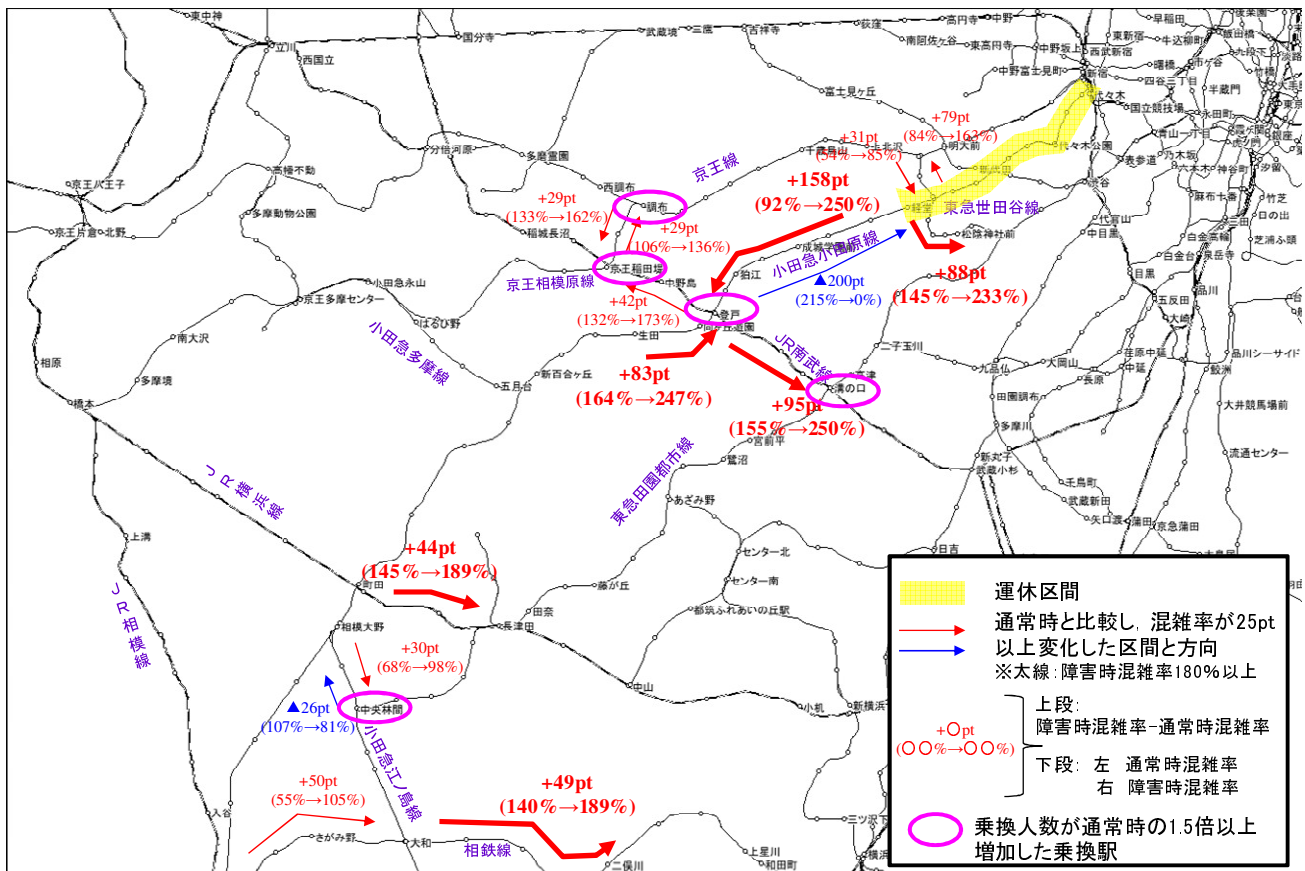


図4 ケース 5における通常時と障害時の駅間混雑率の変化 (運休時間 7:00~7:59, 運休区間: 経堂駅~新宿駅)

付録

本研究で用いた鉄道経路選択モデルは、モデル構造として構造化プロビットモデル¹⁾を採用している。モデル式、効用関数における説明変数、パラメータ推定結果を以下に示す。なお、平成17年大都市交通センサスにおけるデータを用いてパラメータ推定を行っている。

○モデル式

選択確率計算式：

$$P_i = \int_{\varepsilon_1=-\infty}^{+\infty} \int_{\varepsilon_2=-\infty}^{\varepsilon_1+V_1+V_2} \int_{\varepsilon_j=-\infty}^{\varepsilon_1+V_1-V_j} \phi(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_j) d\varepsilon_j \dots d\varepsilon_1$$

$$\phi(\varepsilon) = (2\pi)^{-\frac{j}{2}} |\Sigma|^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2} \varepsilon \Sigma^{-1} \varepsilon^T\right]$$

$$\Sigma = \sigma^2 \underbrace{\begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1j} \\ L_{12} & L_{22} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ L_{1j} & \dots & & L_{jj} \end{pmatrix}}_{\text{経路の長さに依存する誤差}} + \underbrace{\sigma_0^2 I}_{\text{経路固有の誤差}}$$

P_i : 経路 1 の選択確率

$\phi(\varepsilon)$: 確率密度関数 (多変量正規分布)

○効用関数 (確定項)

$$V_i = \sum_k \alpha_k \cdot X_{ik}$$

V_i : 経路 i の効用値

X_{ik} : 経路 i 変数 k の値

α_j : 変数 j のパラメータ

表 鉄道経路選択モデルにおける説明変数

説明変数	説明	符号条件
鉄道費用 (円)	出発地から目的地までの鉄道利用に係る費用	(-)
鉄道乗車時間 (分)	出発地から目的地までの鉄道乗車時間	(-)
乗換待ち時間 (分)	乗換駅 (初乗り駅を含む) における移動時間と列車待ち時間の和。列車待ち時間は列車運行間隔の 1/2 とする。	(-)
混雑指標	朝ピーク時における車両内混雑に対する抵抗感を表現する変数。 出発地から目的地までの各区間における混雑率の 2 乗に乗車時間を乗じた値の合計値。 $\sum \left\{ \left(\frac{\text{区間ごとの混雑率}}{100} \right)^2 \times \text{区間ごとの所要時間} \right\}$	(-)
駅端末利便性	鉄道駅アクセス交通機関選択モデル (ロジットモデル) から計算される各アクセス機関の効用を合成した合成変数。モデルにおける効用関数の説明変数は下表のとおり。	(+)
分散比	経路間の類似性を表現する変数	(+)

表 鉄道駅アクセス交通機関選択モデルにおける説明変数

説明変数	説明	符号条件
総時間 (分)	各手段ごとの出発地から駅までの所要時間	(-)
総費用 (円)	各手段ごとの出発地から駅までの費用	(-)

表 鉄道経路選択モデルパラメータ推定結果

	通勤	通学	私事	業務
鉄道費用 (円)	-0.00240 (-3.62)	-0.0114 (-10.5)	-0.00830 (-4.87)	-0.00260 (-2.00)
鉄道乗車時間 (分)	-0.0987 (-7.94)	-0.114 (-8.74)	-0.151 (-4.14)	-0.115 (-4.67)
乗換待ち時間 (分)	-0.181 (-10.4)	-0.188 (-9.71)	-0.247 (-6.33)	-0.238 (-5.36)
駅端末利便性	0.812 (11.1)	0.308 (9.31)	0.611 (5.72)	0.946 (6.32)
混雑指標	-0.0105 (-3.61)	-0.00880 (-2.05)	-	-
分散パラメータ	0.0365 (2.14)	0.0770 (2.64)	0.312 (1.97)	0.373 (1.82)
尤度比	0.329	0.307	0.294	0.184
サンプル数	1,430	1,130	1,103	1,114

表 鉄道駅アクセス交通機関選択モデルパラメータ推定結果

	通勤	通学	私事	業務	
総時間 (分)	徒歩	-0.191 (-134)	-0.360 (-71.8)	-0.190 (-69.8)	-0.156 (-44.3)
	自転車	-0.177 (-70.0)	-0.264 (-41.5)	-0.187 (-31.5)	-0.142 (-22.4)
	乗用車 (送迎)	-0.168 (-24.4)	-0.171 (-12.6)	-0.120 (-7.35)	-0.140 (-7.07)
	バス	-0.0849 (-29.0)	-0.151 (-22.3)	-0.0493 (-12.6)	-0.0498 (-9.52)
総費用 (円)	-0.00181 (-12.4)	-0.00935 (-17.9)	-0.00321 (-13.2)	-0.00147 (-4.81)	
定数	徒歩	4.97	5.73	3.67	3.21
	自転車	2.22	1.86	0.392	0.687
	乗用車 (送迎)	-2.33	-3.11	-3.14	-1.98
尤度比	0.557	0.522	0.528	0.336	
サンプル数	100,629	21,232	19,541	8,556	