

# 運転再開時における旅客数の予測手法の開発

武藤 雅威\*

## Development of a Method to Predict Passenger Numbers upon Resumption of Train Service

Masai MUTO

Faced with a sudden interruption to train service, passengers must decide what course of action to take. Namely, they can wait until service on the line resumes; make use of the extensive rail network, taking another less direct route to their destination; use an alternative means of transport such as bus or taxi; or cancel their travel plans altogether. The aim of this study is to obtain information on the number of trains required when service is resumed based on an estimation of passenger numbers, so that better methods of train rescheduling can be formulated. This paper shows how to predict passenger demand numbers upon resumption of train service.

キーワード：ダイヤ乱れ，経路迂回，需要予測，Web 調査，非集計モデル，自動改札機データ

### 1. はじめに

大都市圏の鉄道ネットワークにおける一路線で、人身事故などの原因により列車運行が一時中断に至った時、その旅客は平常時の移動とは異なる交通行動を取らざるを得ない。運転再開まで待つ場合もあるし、他路線に乗り換えるなど迂回経路をとる場合もある。また、バスやタクシーなど代替交通機関を利用する場合や、移動そのものを中止する場合もある。一方、鉄道事業者としては、運転再開時にどの程度の旅客数が見込まれるのかを事前に把握することにより、適切な列車本数の確保など、より良い運転整理案を構築することが可能となる。また、運転中断時間の長さに伴う減収規模や、必要な振替輸送量などを想定することも可能となる。本研究は、それらの施策に対する評価指針とすべく、運転中断に遭遇した旅客に対する実行動調査に基づき、経路迂回に関する経路選択モデルを構築し、運転再開時の旅客数を予測する手法を確立することを目的とする。

### 2. 運転中断に遭遇した旅客に対する実行動調査

#### 2.1 データ取得方法

人身事故や車両・設備故障、異常気象などの原因で発生する運転中断は突発的で、発生箇所を事前に特定できない不測の事象である。当然ながら運転中断に遭遇した旅客に対する直接的な行動観測や調査票配布による調査はしにくく、その実行動を把握することは極めて困難で

ある。鉄道輸送の異常時における旅客行動変化や影響を分析した周辺研究としては、新交通システムの事故に伴う運休前後の交通機関選択の影響度を分析した例<sup>1)</sup>、鉄道ネットワーク上のあるリンクを切断して異常時を模擬するシミュレーションを実施した例<sup>2)</sup>、ダイヤ乱れを模擬した仮想質問法（室内実験）による調査で分析を行った例<sup>3) 4)</sup> が散見される。仮想質問法による異常時行動データの取得は比較的容易であるものの、異常時を模擬した状態での回答者の表示意思と、異常時での実行動結果との合致性を検証する必要がある。可能な限り実行動データを取得することが望ましい。

このように、運転中断時における旅客の実行動データを広域的に、かつ発生後速やかに把握した研究例は無い。難易度は高いが、本研究ではあえてそれを目指して可能性を追求し、運転中断に遭遇した旅客をどのように特定するか、その旅客の記憶ができるだけ新鮮なうちに実行動データを取得できないか、それらを可能とする調査方法を検討した。特に、運転中断に遭遇した時点で、「運転再開まであと〇分かかるのではないか」というような旅客が抱く時間的観念をどのように計測するかが重要であり、それがおそらく「迂回経路をとる」か「運転再開を待つ」のかといった行動選択に関する意思決定構造解明への鍵となると考えた。この実現のためには、旅客が運転中断に遭遇した当日中に回答できるような調査システムが必要となる。以上のような状況を勘案し、本研究ではインターネットを利用したアンケート調査（以下、Web 調査）を適用することとした。

\* 輸送情報技術研究部（交通計画）

特集：輸送情報技術

2.2 Web 調査内容

2.2.1 調査概要

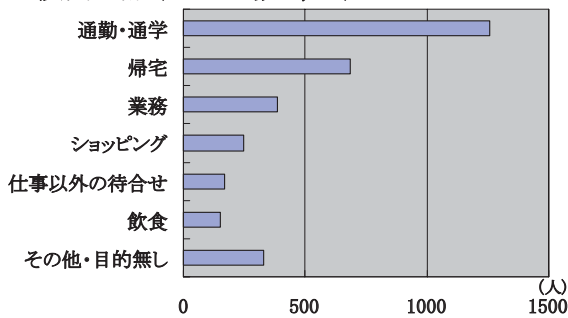
予め Web 調査会社に登録しているモニタ会員に対して、自身が運転中断に遭遇した場面での即日回答を依頼しておく。首都圏・京阪神圏での JR の駅や電車内（新幹線を除く）で、人身事故や鉄道設備の故障、地震など災害の影響などで、電車が来ない、もしくは電車が動かないというような運転中断に遭遇し、次のような体験をした会員から、回答を得る。

- (1) 運転が再開されるのを待った
- (2) 他の鉄道路線に乗り換えた
- (3) 徒歩もしくはバスやタクシーに乗り換えるなど、鉄道を利用しなかった
- (4) 行くことをやめた

表1 主な設問

<移動に関する基礎情報> <ul style="list-style-type: none"> <li>・日時、出発地・到着予定地、利用予定鉄道経路</li> <li>・その経路の利用頻度、運転中断の原因</li> <li>・運転中断を知った場所、迂回経路の認知有無</li> <li>・到着時刻の制約有無、その時の急ぎ具合</li> </ul> <行動結果> <ul style="list-style-type: none"> <li>・"運転再開待ち"or"経路迂回"or "他の交通機関利用"or"移動とり止め"</li> <li>・(迂回者のみ) 振替輸送票の利用有無</li> </ul> <経過時間>遭遇時点を0時点として <ul style="list-style-type: none"> <li>・運転再開までの想定見込時間</li> <li>・「再開見込時間」案内放送の有無と経過時間</li> <li>・実行動までの経過時間</li> </ul>
---

移動目的別(サンプル数:3,224)



運転中断原因別(同:3,224)

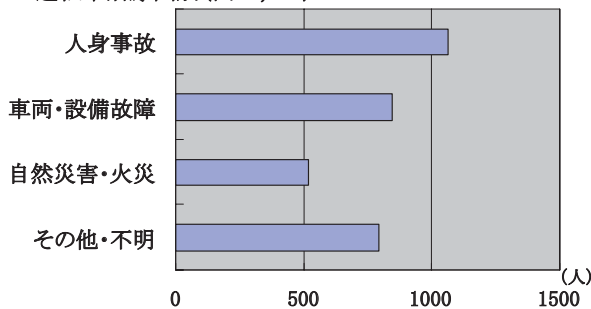


図1 サンプル構成

2.2.2 設問

主な設問を表1に示す。即日回答という特徴を生かして、経過時間に関する設問を充実させている。回答者における運転中断との遭遇時点を時間軸上の0時点とし、その人が想定した運転再開までの見込時間、駅の案内放送などで運転再開見込時間の情報提供が行われるまでの経過時間、実際に行動を起こすまでの経過時間をそれぞれ把握している。これにより、特に時間的観念に着目した行動選択に関わる意思決定構造を明らかにする狙いがある。

2.2.3 調査サンプル数と構成

Web 調査での回答期間は2005年12月20日から2006年2月24日までとし、各会員には調査期間内に一度のみ回答を許す方法により、計3,224サンプルを取得した。その移動目的と運転中断原因に関するサンプル構成を図1に示す。通勤・通学や帰宅など、日常的な利用時が多い。中断原因別では、人身事故や車両・設備故障に伴う中断時のサンプルを多く取得した。また、運転中断の規模としては該当する運転中断事象の運行情報を検索した結果、数分程度から3時間を超えるもの(地震発生の影響)までの範囲で取得していることがわかっている。

3. 集計分析結果

Web 調査で取得したサンプルを用いた集計分析の結果、以下の事柄が判明している。

- (1) 行動結果別の集計では、あくまでも鉄道を利用する「運転再開待ち」と「経路迂回」で全体の90%を占めており、「他の交通機関利用」と「移動のとり止め」はそれぞれ5%程度に過ぎない(図2)。
- (2) 85%以上の鉄道利用旅客が何らかの「運転再開見込時間」を想定している。また、運転再開までの見込み時間を20分以内に想定した旅客は「待つ」傾向にあり、それ以上もしくは「予測がつかなかった」旅客は「迂回」する傾向にある(図3)。
- (3) 「待ち」は「迂回」に比べて、車内で運転中断を知った旅客の比率が高い(図4)。
- (4) 急いでいる人ほど、迂回もしくは他の交通機関を利用する傾向が現れており、目的地までの急ぎ具合が行動結果の選択に影響を及ぼす(図5)。

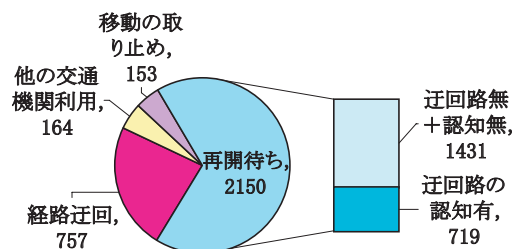


図2 行動結果

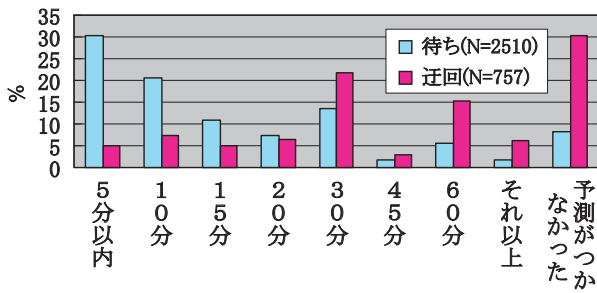


図3 運転再開見込時間と行動結果（待ちと迂回）

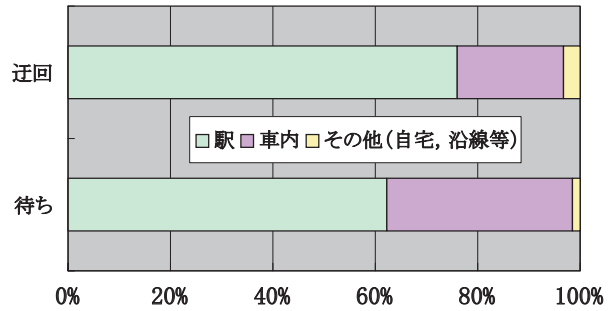


図4 運転中断を知った場所と行動結果（待ちと迂回）

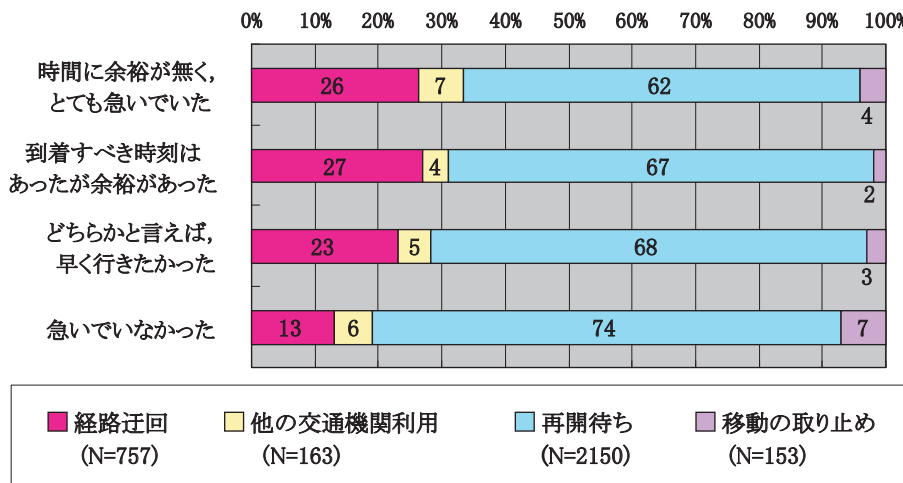


図5 急ぎ具合と行動結果

#### 4. 「迂回」対「待ち」の経路選択モデル

##### 4.1 モデルの考え方

集計分析結果より、運転中断に遭遇した旅客の主な行動結果は、「迂回する」か「運転再開を待つ」かであることが判明した。これを鉄道経路選択問題と見なして、迂回経路を代表的な一経路（最短時間の経路など）に限れば、二者択一型の経路選択モデルを構築できる。モデル構築へ向けて、説明変数として挿入する所要時間を次のように定義する。

・「迂回」の全所要時間＝迂回経路所要時間（乗車時間＋乗換時間）

もう一方の運転再開「待ち」の所要時間については、平常経路での所要時間（乗車時間＋乗換時間）に運転再開までの見込時間を加えたものと定義する。

運転再開見込時間の情報提供がなかった場合は、

・「待ち」の全所要時間＝その旅客による運転再開見込想定時間＋平常経路所要時間

となる。また、運転再開見込時間の情報提供があった場合は、次のように書き換えられる。

・「待ち」の全所要時間＝情報提供による運転再開見込時間＋平常経路所要時間

「迂回」対「待ち」の経路選択モデル化においては、他

線に乗換可能な迂回経路が有りながら行動結果として「待ち」を選択したサンプルのように、二者選択可能なサンプルなどを抽出して、モデル構築用サンプルとして「迂回」540サンプルと「待ち」462サンプルを用いた。モデル型式としては平常時の鉄道経路選択モデルで汎用され、多くの実績を有する非集計ロジットモデルを採用する。モデルの効用関数と選択確率式を式(1)(2)に示す。

$$U_m = \sum_k \beta_k \cdot X_{km} + \alpha \quad (1)$$

$U_m$  : 経路  $m$  の効用  $X_{km}$  :  $k$  番目の説明変数

$\alpha$  : 定数項  $\beta_k$  : 各パラメータ

$$P_1 = \frac{e^{U_1}}{e^{U_1} + e^{U_2}} \quad (2)$$

$P_1$  : 経路 1 の選択確率

$U_{1,2}$  : 経路 1, 経路 2 の効用

( $e$  : 自然対数の底)

平常ダイヤ時の経路選択モデルでは、二経路の効用が全く等しい場合には選択確率は50/50に計算されることが一般的である。しかしながら運転中断時の経路選択問題では、「迂回」と「待ち」の効用が等しい場合、旅客は“当初から利用する予定であった「待ち」経路を選択する”と考えるのが理に適っている。この概念をモデルに反映させるために、「迂回」と「待ち」との効用差に閾値

特集：輸送情報技術

を設定し、この閾値を超えた時に「迂回」経路の選択確率が50%を超えるモデル構造(式(3))に改良した(後述のモデル2へ反映)。

$$P_a = \frac{e^{U_a}}{e^{U_a} + e^{U_a + \Delta}} \quad (3)$$

$P_a$ : 「迂回」経路の選択確率  
 $U_a, U_u$ : 「迂回」経路の効用, 「待ち」経路の効用  
 $\Delta$ : 閾値

4.2 モデルパラメータ推定結果

「迂回」対「待ち」経路選択モデルのパラメータ推計結果を表2に示す。2つのモデルともに、自由度調整済尤度比で良い適合度とされる0.3をはるかに上回り、定数項を除く各説明変数のt値算出結果から判定した各パラメータの有意性にも問題ないことから、十分な説明力を有すると判断できる。モデル1では、全所要時間と他社線ダミー(迂回で他社線を利用する場合=1)に加え、急ぎ具合の設問で「とても急いでいた」旅客に対するダミー変数を挿入した。パラメータ比より、「とても急いでいた」旅客はそうでない人に比べ、約9分半の時間節約

を欲しているに相当していることがわかる。この重要性を指摘できたものの、実際に旅客数を予測する時には、どのような旅客がとても急いでいるのかを特定する必要がある。分析の結果、移動目的や個人属性からは特に判別できず、このデータを整備することが困難となった。よって、モデル1は説明力を有するも実用向きではない。

モデル2では4.1節で示したように、効用差に閾値を設定した。この閾値を「運転再開までの待ち時間」(運転再開見込時間)を変数とする関数形としている。感覚的に言えば、「運転再開までの待ち時間が短いほど迂回しない」傾向にあり、閾値が大きくなるものと考えられる。「運転再開までの待ち時間」の逆数をとることで、その閾値分布は図6に示すようになるが、待ち時間が短いほど閾値が大きくなり、直近ほど急激に大きくなる様子が表現できることがわかる。待ち時間が0(平常運転と同じ)の時は閾値が無限大になるので、「迂回」の選択確率は0となる。5章ではモデル2を用いて、実用性の確認および再現性の検証を行う。

5. モデルの実用性確認および再現性検証

5.1 シミュレーションによる実用性確認

まず、モデル2を利用したシミュレーションで迂回経路への選択傾向を把握することで実用性を確認する。ケーススタディ路線はJRのX駅からY駅(JR-A線直通)へ向かう旅客で、運転中断時にはJR-B線からN駅乗り換えで、並行会社C線へ迂回する状況である(図7)。その運転中断から再開までのシナリオ(仮想条件)は、以下のとおりである。

15:00 JR-A線で人身事故発生→運転抑止

この後、X駅に現れた旅客は皆、迂回経路を認知し、16:00に運転再開すると自己予測

15:31 「運転再開見込み時刻は15:45」とX駅でアナウンス開始

15:45 運転再開

シミュレーションでは、X駅に現れる旅客が迂回経路

表2 経路選択モデルパラメータ推定結果

パラメータ下段の( )内はt値

効用関数:U		パラメータ:β	
		モデル1	モデル2
説明関数	全所要時間: $x_1$ 【共通変数】	-0.059 (-12.33) **	-0.053 (-10.03) **
	他社線ダミー: $x_2$	-0.868 (-4.99) **	-0.929 (-5.27) **
	「とても急いでいた」ダミー: $x_3$	0.558 (2.59) **	—
	定数項: $\alpha$	0.048 (0.34)	-0.144 (-0.84)
閾値	運転再開までの待ち時間の逆数: $\Delta$	—	0.543 (1.98) *
自由度調整済尤度比的中率		0.364	0.367
		78.6%	78.4%

[注] t値とはパラメータの有意性を示す検定統計量  
 t値から見た有意性 \*\* 1%水準で有意  
 \* 5%水準で有意

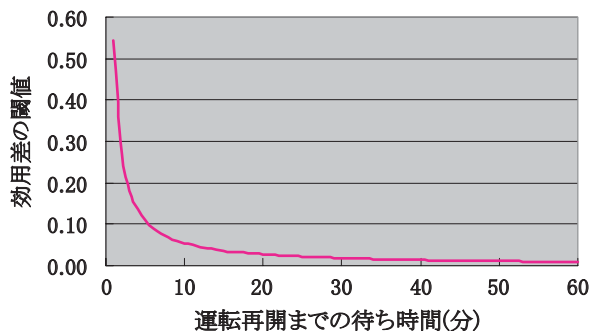


図6 モデル2での閾値分布

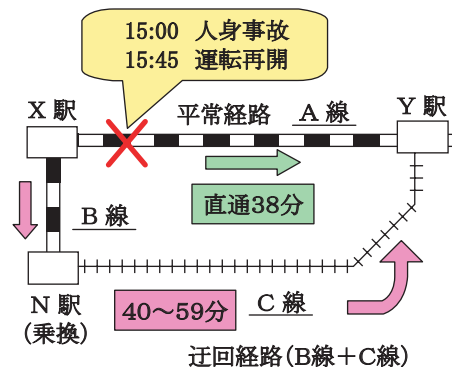


図7 シミュレーション路線

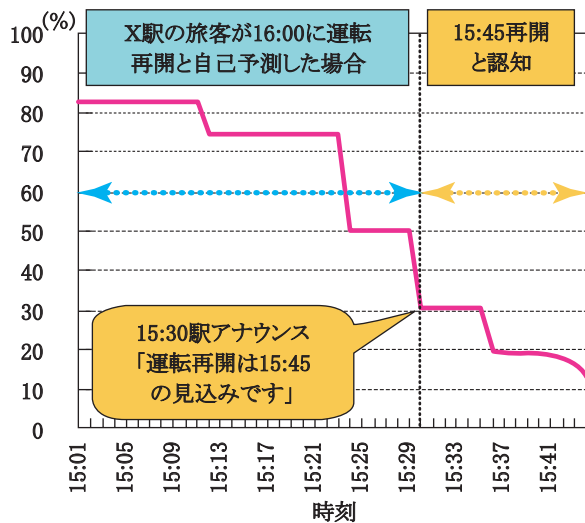


図8 迂回経路選択確率の計算結果

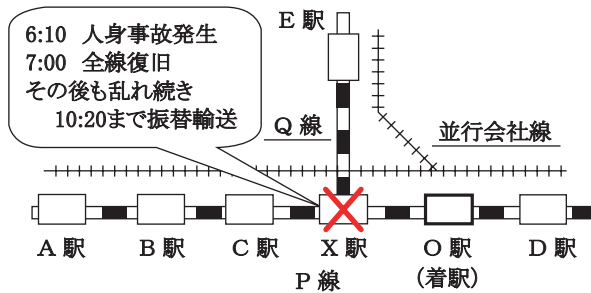


図9 再現性検証の路線

表3 乱れ発生日の旅客減少数（人）

	平常日	乱れ日	減少数	減少率
A 駅	1,630	1,412	218	13.4%
B 駅	1,099	885	214	19.5%
C 駅	5,112	4,493	619	12.1%
D 駅	1,987	1,783	204	10.3%
E 駅	876	370	506	57.8%

A～E 駅発 O 駅着 6:30～10:00 の旅客数

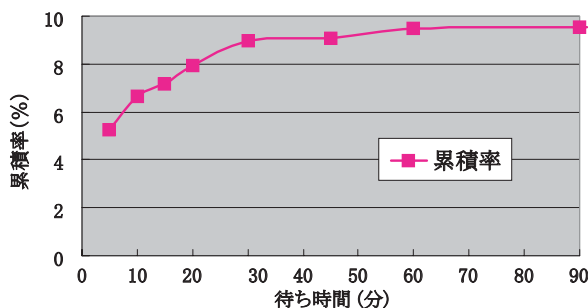


図10 待ち時間と非鉄道利用者累積率

を選択する確率を1分毎に計算する。X 駅に現れた旅客が「16:00 に運転再開すると自己予測した場合」のシミュレーション結果を図8に示す。事故発生直後では“約60分待たされる”という設定から迂回経路の選択確率は80

%を超え、高い割合となる。15:30に「運転再開は15:45」とアナウンスされると、旅客が抱く運転再開見込時間が29分から14分書き換えられるため、選択確率は一気に下降(約50→30%)する。なお、X 駅でのJR-B線列車の発車が12分間隔のため、選択確率にも同じ間隔で段差が生じている(B線列車が発車した直後に選択確率が下がる)。

このように、迂回経路選択確率の時間経過に伴う変動や、運転再開見込時間の案内による効果などを把握できることが明らかになり、モデルの実用性が確認できた。

## 5.2 輸送障害時の輸送実績データを用いた再現性検証

### 5.2.1 輸送障害の事例

さらにモデル2を用いて、実際に発生した輸送障害時における旅客減少数について試算を行い、各種輸送実績データと比較してモデルの再現性を検証する。

- ・2月木曜日 AM6:10 頃、JR-P線のX 駅構内で人身事故発生(路線図を図9に示す)
- ・当該路線および接続する路線(Q線)で運転見合わせ
- ・6:45 頃に当該線以外で運転再開、7:00 頃に全線で再開
- ・その後もダイヤ乱れが続き、後続列車など約90本が運休、約200本が最大100分遅れ、15万人余に影響
- ・6:40 から並行会社線への振替輸送実施(10:20 まで)

### 5.2.2 自動改札機データから見た旅客減少数

自動改札機は、通過する旅客数を集計する機能を有している。出場駅の改札機データからは、各入場駅から出場駅までの到着時間帯別の旅客数(OD量)がわかる。P、Q線内に存在するA～E 駅を発してO 駅着6:30～10:00の旅客におけるダイヤ乱れ発生日(木曜日)と、その前後日(水・金曜日)平均の旅客数の比較を表3に示す。乱れ日にはどの駅でも旅客数が減少している。当日、各駅では振替輸送票を配布しており、並行する会社線へ経路迂回した旅客の存在が確認されている。

### 5.2.3 試算での前提条件

(1) 対象外旅客(非鉄道利用、迂回路認知無)の除却

Web調査によれば、待ち時間と鉄道非利用者(他の交通機関を利用+移動とり止め)累積率との関係は図10に示すとおりであり、その割合で選択確率計算前に非利用者数分を除却する。また、迂回経路の認知度は迂回の難易性や個人差により変動するが、Web調査では迂回経路を有する者の平均認知度は約65%であった。この路線における迂回経路認知度を実測していないため、本試算では50～80%の間で変動するものと仮定し、最小値から最大値までの範囲で予測する幅推定を行うこととする。

(2) モデルの拡大利用および所要時間の与え方

本モデルは運転再開直前までの行動をトレースしているが、本試算では運転再開後も乱れたダイヤ運行による影響を把握するため、モデルを運転再開後の行動選択確

特集：輸送情報技術

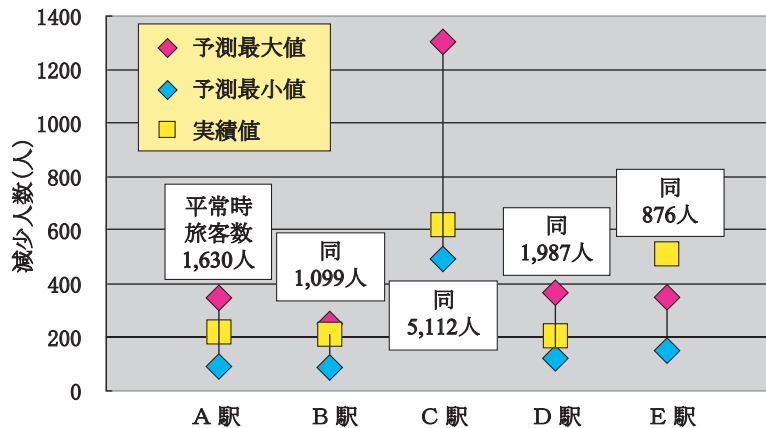


図 11 減少数の予測値（幅推定）と実績値  
〔A～D 駅では予測範囲内、E 駅では過小推計〕

率の計算にも拡大利用する。よって、「運転再開見込時間」には、平常ダイヤ時刻で乗車するつもりで駅に現れた旅客における待ち時間の平均値を挿入する。また、運転本数の減少に併せて、この時の所要時間は平常時よりも 1.4～2.4 倍、平均 1.79 倍（C 駅発列車の場合）まで延びていることが列車運行実績データより判明している。当日の旅客は遅延情報等を参照しながら、どの程度まで所要時間の延びを認識していたかは不明瞭であるが、本試算では、平常どおり～平常時の 1.7 倍の間で認識するものと仮定し、最小値から最大値までの範囲で予測する幅推定を行うこととする。

5.2.4 試算結果

本試算では、この自動改札機での集計単位である 30 分毎に、旅客の迂回率と減少数を計算した。A～E 駅から O 駅へ向かう旅客の減少数の予測値（幅推定範囲）と実績値を図 11 に示す。P 線の A～D 駅の実減少数は、幅推定予測値の中に含まれているが、Q 線の E 駅では過小推計となった。当日の Q 線各駅での振替乗車票発行枚数の比率は P 線各駅よりも比較的多めであることが確認されており、その影響を受けたものと考えられる。

このように、実際に発生した運転中断時での実績減少数とモデルでの試算減少数を照合することで再現性を検証した。E 駅のような特異的な箇所を除き、実績値はモデルによる予測範囲内に収まっており、この予測手法の妥当性が確認できた。特異的な箇所の予測に際しては、実績値との差分補正を行うことで対処することとしたい。

6. 結論

本研究で得た知見は、以下のように集約される。

- (1) これまで取得が困難であった異常時実行動データに対して、即日回答型 Web 調査を適用し、時間的観念を把握するという一つの取得方法を見出した。
- (2) Web 調査の集計分析結果から、8 割以上の鉄道利用

旅客が“運転再開まで、あと〇分はかかるだろう”といった見込時間を自ら想定していることや、行動結果としては「迂回する」か「運転再開を待つ」という、あくまでも鉄道を利用する者が大勢を占め、その選択行動に対しては、目的地までの急ぎ具合などの要因が影響を及ぼすことなどが判明した。

- (3) 非集計ロジットモデル型による「迂回」対「待ち」の経路選択モデルを構築したところ、乗車時間に運転再開までの待ち時間を加えた全所要時間を説明変数として導入すること及び、待ち時間の逆数を用いた閾値を導入することが、それぞれ有効な改良策であると判明した。
- (4) 特異的な箇所を除けば、本モデルによる予測値はある程度の再現性を有している。なお、予測手法の実用化へ向けては、運転中断原因ごとに旅客が想定する運転再開見込所要時間分布の計測や、予測対象とする駅・沿線での迂回経路認知度調査の実施など、シミュレーション・モデルの補正改良作業を行うことで、より精緻な予測が可能となると考えられる。

文献

- 1) 若林拓史, 浅岡克彦, 亀田弘行, 飯田恭敬: 交通手段選択における所要時間信頼性の影響と交通サービス途絶時の利用者の意識変化に関する研究, 土木学会論文集, No.632/IV-45, pp.29-40, 1999
- 2) 浅見均: 代替ルート構築によるリンク途絶時の社会的損失緩和, 運輸政策研究, Vol.7, No.2, pp.30-36, 2004
- 3) 有澤理一郎, 藤浪浩平, 中川剛志ほか: ダイヤ乱れ時のお客さま行動とニーズの研究, 鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, No.43, pp.14-18, 2006
- 4) 小林繭美, 高田和幸, 高山辰喜: 鉄道輸送サービス遅延時の旅客の選択行動に関する分析, 土木計画学研究・講演集, Vol.34(328), CD-ROM, 2006