

# 都市鉄道における列車選択行動モデルの構築

深澤 紀子\* 柴田 宗典\*

A Study for Passengers' Train Choice Model in Urban Railways

Noriko FUKASAWA Munenori SHIBATA

This study aims to develop a passenger's behavior model for train choice from among various types of train service such as local and rapid service in urban railways, in order to evaluate passengers' flow. This paper describes an online survey method of obtaining passenger activity data using the image of departure information display. A disaggregate demand model has been developed for train choice behavior based on the survey data which were collected using the method. The developed model is put into practice by means of an application named "Train-Choice Model Viewer", which can calculate the time series data of passengers' volume in stations and trains. It makes it possible to simulate the congestion level of each train and station when the time schedule is inputted.

キーワード：列車選択行動，都市鉄道，非集計ロジットモデル，旅客流動，発車標

## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景と目的

都市圏の鉄道においては1路線に何種類もの列車種別(急行/快速/各駅停車など)を設定し、通過運転により所要時間の短縮を行っている。このような運用により、早く到着したい場合には急行や快速、乗換えせずに目的駅まで行きたい場合には各駅停車というように、旅客は移動目的や嗜好に合わせて利用する列車を選択することができる。現在、鉄道事業者は指定席を除く旅客の利用列車をあまり把握していないが、円滑な輸送サービスを提供するためには、旅客の列車選択に影響を与える要因を特定し、その結果、各列車の乗車率として現象化する利用者行動を正確に把握することが重要である。

交通ネットワークの拡充とともに、新線建設に際しての需要予測や、路線競合区間の旅客分担率推定などの目的で、多くの先行研究において経路選択モデルに関する取り組みが行われてきた<sup>1)</sup>。しかしながら同一路線の中で、どの列車を選択するかについての旅客行動モデルに関する研究の蓄積は少ない。そこで本研究では、どのような旅客がどのような状況でどの列車種別を選択したのかに関する旅客行動データから、列車選択の判断に影響を与える要因を特定し、列車選択に関する旅客行動モデルの構築を図ることとした。

本研究では大都市圏のある主要路線をケーススタディの対象とした。この路線は方向別複数線に、各駅停車から最も速達の列車まで3種類の列車が走行する緩急分離運転を行っており、列車種別や運行本数が多く、複雑な

\* 信号・情報技術研究部 交通計画研究室

運用がされている。このため、旅客の列車選択行動に影響する要因を特定し、列車選択行動の実態を把握することが、より円滑な輸送サービスの実現に繋がると考えられる。なお、運転見合わせ時における「迂回」対「待ち」の旅客行動については、すでに先行研究<sup>2)</sup>にて経路選択モデルが構築されているため対象外とし、本研究では平常運転から15分程度以内の遅延までを対象とした。

### 1.2 列車選択のモデル化に関する考え方

都市内交通の需要分析や需要予測では、非集計ロジットモデル等の非集計選択行動モデルが適用されることが一般的である。この非集計選択行動モデルはランダム効用理論に基づき、旅行者は利用可能な複数の選択肢を代替案として認識したうえで、それぞれのサービスレベルである所要時間や運賃・料金等を比較して合理的に利用する経路や交通機関を選択しているとの前提に立ち、旅客の選択行動を数理的にモデル化する手法である。旅客が鉄道を利用する場面において急行列車と緩行列車のどちらを選択するかは、所要時間や混雑具合など、それぞれのサービスレベルを比較検討し自分にとって望ましい経路、すなわち列車を選択していると考えられるため、本研究ではこの列車選択問題を経路選択問題の一つとして捉え、非集計ロジットモデルを適用させることを前提として検討を進めた。また、非集計行動モデルによる予測では個人の行動を集計する際の取り扱いが課題となる<sup>3)</sup>が、構築したモデルにより旅客流動の推定を行う際には、自動改札機の入出場データから得られる時間帯別の駅間移動旅客数データ(ODデータ)を用いて予測対象とする路線の旅客総数を設定することにより、この課題を補完することとした。

## 2. 旅客の列車選択に関する現状調査

### 2.1 列車選択に影響を与える要因

列車選択モデルの構築にあたっては、各列車種別の効用を説明する因子の選択が重要な過程の一つである。1路線における複数の列車種別の選択を経路選択問題として扱う場合には、一般的な経路選択問題の主要な説明変数の一つである費用、すなわち運賃が同一になることなどから、列車選択問題に妥当な説明変数の抽出が必要である。そこで列車選択に影響を与える要因を洗い出すための調査を行った。

本研究で検討対象とする大都市圏主要路線を日常的に利用する旅客を対象に、直近の利用時に利用した列車の種別とその列車種別を選んだ理由について、実際の利用経験に基づく実行動調査（Revealed Preference 調査、以降 RP 調査）を実施した。調査概要を表1に示す。

いずれの列車種別も選択可能だった回答者について、実際の列車選択の結果とその選択要因に関する集計を行った結果を図1に示す。その結果、「とにかく早く着きたかった」「停車駅が少ない」「乗車時間が少ない」「乗換えせずに目的地に到着できる」「車内が空いていた」といった到着時刻、乗車時間、停車駅数、乗換の有無、車内の混雑に関わる理由について“あてはまる”と回答した割合が高く、一方「シートが座りやすい」「乗り心地がいい」「女性専用車両がある」「トイレがある」といった車両の設備や特徴に関する要因は重要視されていないことが明らかになった。このことから、列車種別の効用関数を説明する因子として、到着時刻、乗車時間、待ち時間などの時間に関するもの、停車駅数、乗換回数などの鉄道利用時の煩雑さに関するもの、そして混雑具合を採用することとした。

表1 列車選択に関する現状調査概要

調査期間	2010年8月25日(水)～9月2日(木)
調査対象者	対象路線の日常的な利用者 (利用頻度週1-2回以上)
調査方法	WEBアンケートによるRP調査
データ数	回収数1,153票、 うち要因抽出における採択データ数 (すべての列車種別を選択することのできる 駅間および時間帯の利用者)503票

### 2.2 発車標画像を用いた列車選択データ収集方法

人の移動に関するデータ収集は、大都市交通センサスに代表されるパーソントリップ調査でしばしば実施されており、その多くはどのような人がどのような目的・交通手段で、どこからどこへ移動したか、1日の移動について調査をしている。一方、非集計ロジットモデル等の非集計行動モデルを構築するためには、選択した結果(すなわち、実際に用いた経路/交通機関/列車)だけでなく、結果として選ばなかった選択肢(すなわち、候補だったが実際には用いなかった経路/交通機関/列車)についてもデータを収集することが望ましい。特に本研究で検討対象としている、複数種別の列車の中から1列車を選択する場面では、駅への到着時刻によって選択肢が異なる上に、先発列車と次発列車それぞれの待ち時間や停車駅等、細かな状況の相違で選択結果が異なるため、選択の最終的な結果であるトリップデータだけでなく、行動を選択したときの状況に関する詳細なデータが必要である。

そこで回答者が乗車駅に到着した際に改札口またはホームで発車標の写真を撮影してもらい、その画像データを基にトリップデータを収集することとした。発車標

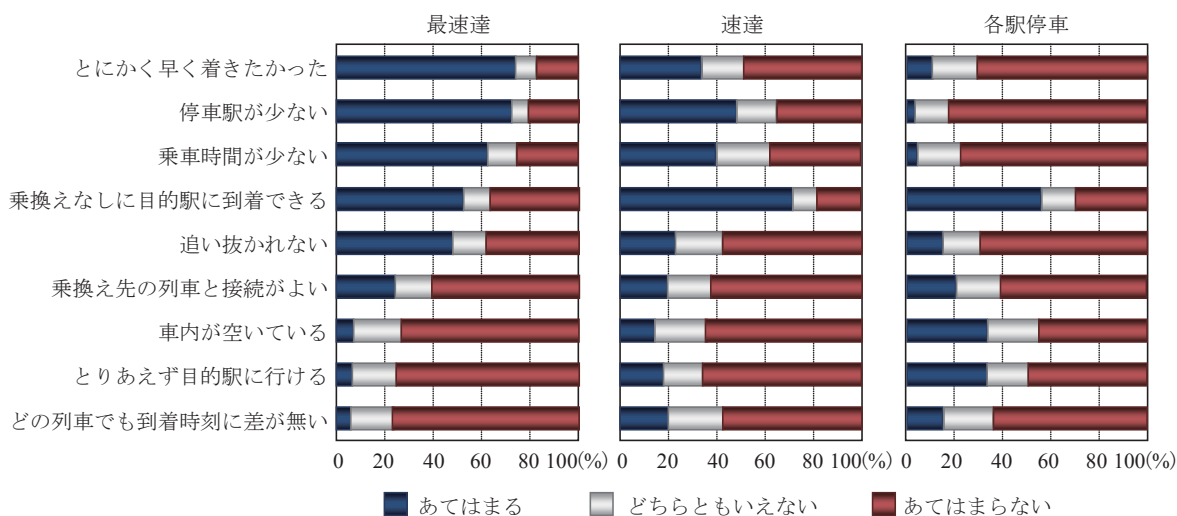


図1 選択した列車種別とその選択理由

に掲示されている列車は旅客が選ぶことのできる選択肢一覧であり、掲載されている各列車の諸元は比較検討すべきサービスレベルである。旅客が各列車について、目的駅までの到着時刻や乗換回数などをどのように認識し、どの列車を選び、どの列車を選ばなかったのか調査することで、選択結果と各選択肢のサービスレベルを同時に把握することができる。また過去の自分の経験を問う RP 調査では過去に遡って調査を行うため、特に選ばなかった選択肢のサービスレベルについて曖昧な記憶しかない場合があるという可測性に関する課題があげられている<sup>3)</sup>が、この調査方法では選択時の状況を画像に残すことでこの課題を改善することができる。さらに従来のパーソントリップ調査では回答者の自己申告に頼らざるを得ないため、経路や実際の運行状況とは矛盾したデータが収集されるケースが少なからずあるが、この調査方法を用いた場合、発車標の写真は回答のエビデンスとして利用可能であり、収集するトリップデータの信頼性を高めることができる。

本調査方法は、カメラ付き携帯電話やスマートフォンの普及によりいつでも気軽に写真撮影が可能になったこと、またインターネットを通して画像データの送受信が容易になったことなど、情報通信技術の発展により一般化した WEB 調査の利点を最大限に生かした、鉄道における新しいパーソントリップ調査の一方法といえる。

### 2.3 列車選択に関する現状調査

本研究にてケーススタディの対象とする路線を日常的に利用する旅客を対象に、直近（1週間程度以内）で当該路線を利用したときの、出発駅から到着駅までのすべての乗車列車とその列車を選択した理由、および実際には乗車しなかったが候補だった列車について、実際の利用経験を問う RP 調査を WEB アンケートにて実施した。本調査の目的は、列車選択の実態把握であるため、調査対象者は運用されている 3 種類の列車種別すべてを選択できる駅間および時間帯の利用者に限定した。調査概要を表 2 に示す。

本調査では図 2 に示すように、発車標の画像をアップロードしてもらったとともに、実際に乗車した列車だけでなく発車標に掲載されているすべての列車に関する、目

表 2 列車選択に関する現状調査概要

調査期間	2011 年 2 月 25 日（水）～3 月 11 日（金）
調査対象者	対象路線の日常的な利用者 (利用頻度週 1-2 回以上、すべての列車種別を選択することのできる駅間および時間帯の利用者)
調査方法	WEB アンケートによる RP 調査
データ数	775 票

#### ① 発駅到着時に発車標を写真撮影



#### ② WEB 調査回答欄：発車標の画像をアップロードし、掲載されていた全列車について、（自分自身が予想していた）到着順、到着時刻の差、混雑具合、実際に乗車した列車を記入

#### 【回答欄】

種別	時刻	行先	到着時刻差	混雑具合*1	乗車した列車	列車降車駅
各駅停車	19:00	C 駅	5 分	2		T 駅
速達	19:04	A 駅	0 分	4	○	T 駅
最速達	19:07	B 駅	0 分	4		S 駅
各駅停車	19:09	C 駅	15 分	2		T 駅

\*1：混雑具合は（1:ガラガラであり、好きなどころに座れる／2:一部席が空いており、座れる／3:座れないが、それほど混んでいない／4:混雑している）から選択

図 2 発車標画像を用いた列車選択調査

的駅までの到着順、到着時間差、混雑具合、その列車に乗車したときに当該列車を降車する駅について、回答者自身が列車選択時にどう考えていたか、もしくは予測していたかといった旅客の認知に関するデータを収集した。

### 2.4 列車選択に関する現状調査結果

列車選択に関する調査結果の概要を図 3 に示す。利用時間は自動改札機データ等ですでに把握されている利用人数とほぼ同等の人数比が得られているが、調査対象者をすべての列車種別を利用できる駅間および時間帯の利用者としたため、利用時間帯の集計結果では早朝および深夜時間帯の利用者が除外されている。また、通勤・通学・通勤以外の業務のために利用している旅客が 74% を占め、急いでいる旅客の割合は 61%、残りの 39% の旅客は時間的余裕をもって移動していた。乗車キロ程が 30 キロ未満である旅客が 64% を占め、乗車駅間に含まれる最速達列車の停車駅数が 2 駅以下の旅客が 58% であった。また、乗換えをせず 1 列車のみで移動している旅客が 84% を占め、2 回以上乗換えている旅客は 1% に満たないことが明らかになった。また発駅で選択した列車は、ほぼ均等に 3 種別に分散している。その選択理由は「到着時刻がちょうどいい」、「乗車時間が少ない」など、時間に関連する理由とともに、「乗換えの必要がない」という理由についてあてはまると回答した割合が高かつ

特集：輸送計画・情報技術

た。さらに列車が「混雑していない」ことを理由とする割合も40%を占めた。

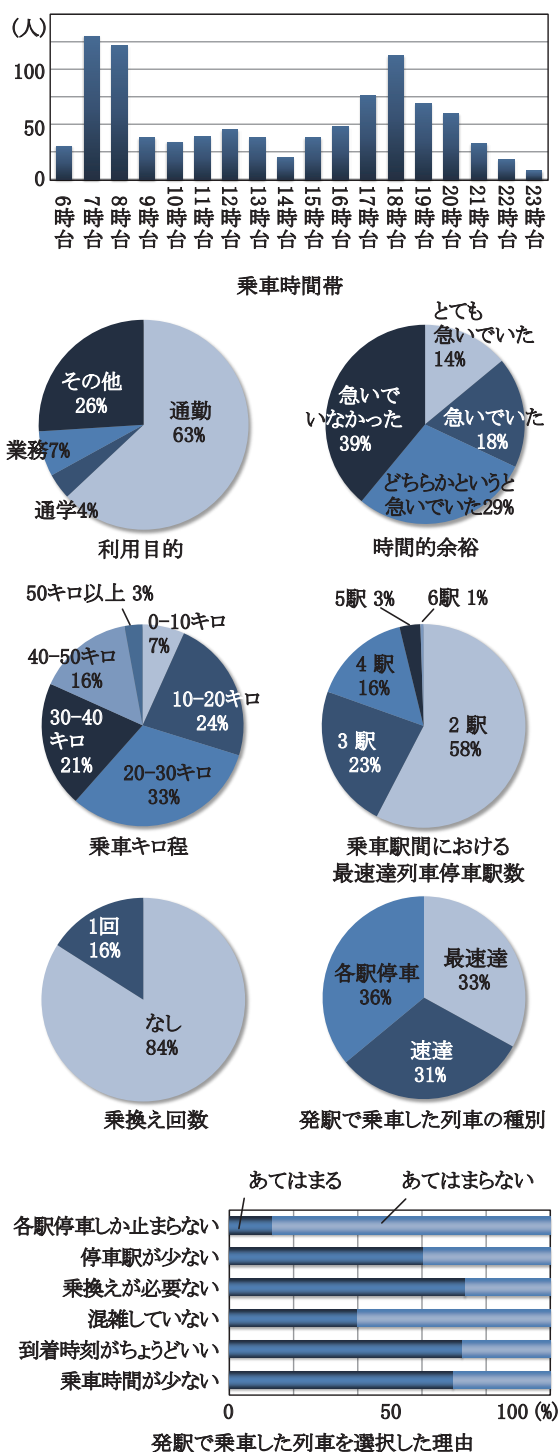


図3 列車選択に関する現状調査結果

### 3. 列車選択モデルの構築

#### 3.1 非集計ロジットモデルの適用

本研究において検討対象とした大都市圏主要路線には3種類の列車が運用されているが、簡単のために急行列車への乗車を一経路、緩行列車への乗車をもう一つの経路とする二者択一型の経路選択モデルを考えた。また乗車距離によって、急行列車/緩行列車の定義を分けることとし、短距離乗車の場合は急行列車=最速達列車と速達列車、緩行列車=各駅停車とし、長距離乗車の場合は急行列車=最速達列車、緩行列車=速達列車・各駅停車とした。これは、短距離乗車の場合には、乗車時間や停車駅数といった種別ごとの特徴が最速達列車と速達列車との間で差がみられなくなることで、一方で長距離乗車の場合は、前述の最速達列車と速達列車とで所要時間等の差が顕著になる他、各駅停車を選んで乗車する旅客は極めて少ないという理由による。また長距離と短距離の分類については、最速達列車の停車駅数が2駅以下か、3駅以上かで分類することとした。上記の条件にあてはめ、サンプルとして421件を抽出しモデル作成に用いた。

また説明変数として挿入する乗換回数については、個々の回答データごとにその回答者の乗車駅・降車駅データと、図2に示す回答欄に入力された「その列車に乗った場合に降車する駅」の回答から、想定される乗換回数を別途調査して設定した。また列車遅延の有無については、遅れ時分も含めた列車の到着順や到着時刻差の認知データを収集しているため、到着時刻差の数値をそのまま用いることとした。

1章で述べたとおり、列車選択モデルの構築には非集計ロジットモデルを採用した。このモデルは、ランダム効用理論をベースに個人の選択行動を数理的にモデル化するもので、ある個人が選択肢1,2の中から、選択肢1を選択する確率 $P_1$ を式(1)のように定義する。

$$P_1 = \frac{e^{U_1}}{e^{U_1} + e^{U_2}} \quad (1)$$

$U_1, U_2$ : 経路1および2の効用

また経路 $m$ の効用関数式 $U_m$ を式(2)に示す。

$$U_m = \sum_k \beta_{km} \cdot X_{km} + \alpha_m \quad (2)$$

$U_m$ : 経路 $m$ の効用

$X_{km}$ :  $k$ 番目の説明変数

$\alpha_m$ : 定数項

$\beta_{km}$ : 各パラメータ

### 3.2 パラメータ推計結果

最尤法を用いて推定した「急行列車」対「緩行列車」の結果を表3に示す。モデルのデータに対する当てはまりを示す指標である尤度比は短距離乗車モデルで0.358、長距離乗車モデルでは0.522であり、どちらにおいても望ましいとされている0.2を上回っており、十分な精度を持つと判断できる。パラメータが有意にならず選択されなかった説明変数は“—”を記している。乗車距離の長短に関わらず、総所要時間、列車混雑具合について有意に負の影響があり、乗換え回数は短距離乗車の場合にのみ負の影響を与える一方、長距離乗車の場合には影響は見られなかった。またホームの混雑具合についても短距離乗車の場合に有意に負の影響が確認された。一方、前章の列車選択の要因調査にて回答者の多くが選択した効用に対する影響は確認できなかった。

また、モデルの検証のため、これまでの調査と同じ対象路線において、約1年後に収集した列車選択に関するRP調査データ303件を用いて的中率を計算したところ

表3 列車選択モデルパラメータ推計結果

効用関数：U	短距離乗車		長距離乗車	
	パラメータ：β (t値)		パラメータ：β (t値)	
総所要時間 (分)	-0.180	(-5.540***)	-0.185	(-4.955***)
総乗車時間 (分)	—	—	—	—
総待ち時間 (分)	—	—	—	—
出発駅待ち時間 (分)	—	—	—	—
停車駅数 (分)	—	—	—	—
乗換え回数 (回)	-1.968	(-3.364***)	—	—
列車混雑具合 *1	-1.121	(-5.519***)	-1.417	(-4.862***)
ホーム混雑具合 *2	-0.364	(-3.463***)	-0.223	(-1.537)
年齢	—	—	—	—
性別	—	—	—	—
移動目的 *3	—	—	—	—
時間的余裕 *4	—	—	—	—
往路/復路 *5	-0.571	(-1.753*)	-0.883	(-1.842*)
尤度比	0.358		0.522	
的中率	78.9%		84.8%	

\*\*\* : p<0.01, \*\* : p<0.05, \* : p<0.1

- \*1 列車混雑具合：1. ガラガラで好きなところに座れる／2. 一部席が空いており座れる／3. 座れないがそれほど混んでいない／4. 混雑している
- \*2 ホーム混雑具合：1. 乗車口には人は並んでおらず自由に歩けた／2. 一部の乗車口には人が並んでいたが気にせず歩けた／3. 全乗車口に人が並んでいたが、歩くのには苦勞しなかった／4. 全乗車口に人が並んでおり、歩くのには苦勞した
- \*3 移動目的：1. 通勤や業務などビジネスのための利用／0. プライベートでの利用
- \*4 時間的余裕：1. とても急いでいた／2. 急いでいた／3. どちらかというと急いでいた／4. 急いでいなかった
- \*5 往路復路：1. 往路／0. 復路

短距離 71.0%，長距離 77.8% という比較的良好的な結果を得た。このことは構築したモデルが時間移転性を持つことを示している。検証用データに関する調査概要を表4に示す。

表4 モデル検証用列車選択調査概要

調査期間	2012年2月13日(月)～2月21日(火)
調査対象者	対象路線の日常的な利用者 (利用頻度週1-2回以上、すべての列車種別を選択することのできる駅間および時間帯の利用者)
調査方法	WEBアンケートによるRP調査
データ数	303票

### 4. 列車選択モデルによる列車乗車人数および駅滞留旅客数推定

都市部における稠密な運行計画ダイヤでは、1本の列車の運行時刻が1-2分ずれただけで、路線全体の混雑が緩和、あるいは悪化する事態が起こりうる。よってダイヤ改正のときには旅客の利用実態に即した運行計画ダイヤ案を作成する必要があり、慎重な改正案の作成が要求される。そこで構築した列車選択モデルを活用する方法の1提案として、列車と駅の混雑具合を同時に評価することのできる列車選択モデルビューアを作成した。これは列車ダイヤデータと構築した列車選択モデルから、対象とする路線の全駅、走行する全列車の時系列旅客数を算出するものであり、1章で述べたように、自動改札機の入出場データから得られる時間帯別の駅間移動旅客数データ(ODデータ)を総旅客数として、当該旅客が同一の選択行動を行なっていると見做す。これにより、非集計モデルの集計化の課題を克服することができる。

具体的には、時間帯別ODデータに則り任意の駅に発生した旅客一人一人について、当該駅を当該時刻以降に発車する急行列車/緩行列車それぞれの、当該旅客にとっての効用を列車選択モデルを用いて算出し乗車確率を計算する。結果出力の画面例を図4に示す。画面上部に示す時刻表示に従い、簡略化した配線図上を列車種別ごとに色分けされた列車が運行計画ダイヤどおりに走行する。列車上部の横棒グラフは各列車の混雑具合を示す。列車が駅に到着すると、当該駅での乗降客数により列車混雑具合が変化する。また、配線図下の縦棒グラフは各駅の滞留旅客数を示す。時刻が進むにつれ、ODデータに従い滞留旅客数が増加する。列車が発車するタイミングで、列車選択モデルで算出された選択確率に従いその列車に乗車すると判断された旅客数が減少する。

また、算出した各列車乗車人数と各駅滞留旅客数の時系列データは外部ファイルに出力可能である。ある駅に

特集：輸送計画・情報技術

着目した時系列滞留旅客数の算出例を図5に示す。例示した駅では、朝の通勤時間帯に小さなピークがあるものの、夜18時以降により大きな混雑が生じる。19時台に最も混雑し、終電まで混雑が持続する。図6に、ある列車の各駅間の乗車旅客数の算出例を示す。当該列車はラッシュ時に運行される列車であり、都市圏の中心部であるS駅で多くの旅客が乗車する。その後、徐々に旅客数は減少するが、Y駅以降再び混雑が増加する。このように、列車選択モデルビューアを用いることにより、各駅、各列車の混雑具合の特徴を把握することができる。

なお、本列車選択モデルビューアに、新しい列車運行計画ダイヤを入力した場合は、極端に混雑すると予想される列車や駅、時間帯などの事前検証が可能になる。一方、実績ダイヤデータを入力した場合には、数分程度の列車遅延が、駅や列車の混雑具合にどう影響したかに関する事後検証に活用することが可能である。

5. おわりに

本研究ではこれまで検討事例が希少であった、都市鉄道における急行／各駅停車などの複数の列車種別の選択問題について、旅客の列車選択行動のモデル化を行った。またその過程において、旅客の列車選択の現状を把握するため、駅到着時の発車標の写真を基にした列車選択データの新しい収集方法を提案した。これは情報通信技術の発展により一般化したWEB調査の利点を生かした、鉄道における新しいパーソントリップ調査の一方法であり、選んだ選択肢と選ばなかった選択肢の双方について信頼性の高いデータを収集することができる。このデータ収集方法で収集したデータを用い、非集計ロジックモデルを適用させた列車選択モデルを、短距離乗車の旅客と長距離乗車の旅客それぞれについて構築した。その結果、モデルの適合度を示す指標である尤度比について十分に高い適合度を示す値を得た。また的中率について78.9%、84.8%という良い結果を得ることができ、さらに約1年後のデータを用いて検証した結果、モデルの時間移転性を確認することができた。

一方、今回採用したデータ収集方法の特性上、例えば乗車駅において当駅始発の列車を待つ旅客など、発車標に掲載されていない列車を選択する旅客のデータはモデルに含まれていない。引き続きデータ収集を行い、さまざまな行動パターンの旅客をモデルに取り込むことにより、モデルの精緻化を進め、旅客の流れを総合的に把握するための研究につなげていく予定である。

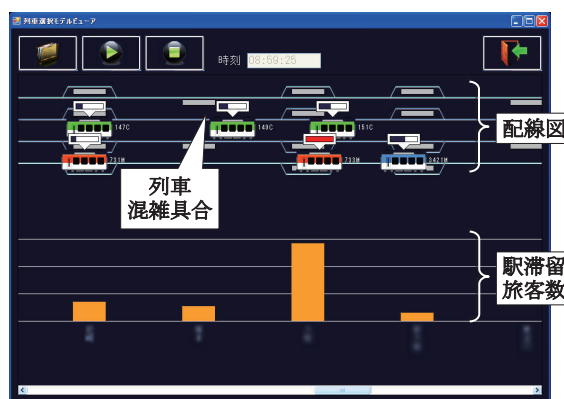


図4 列車選択モデルビューア画面例

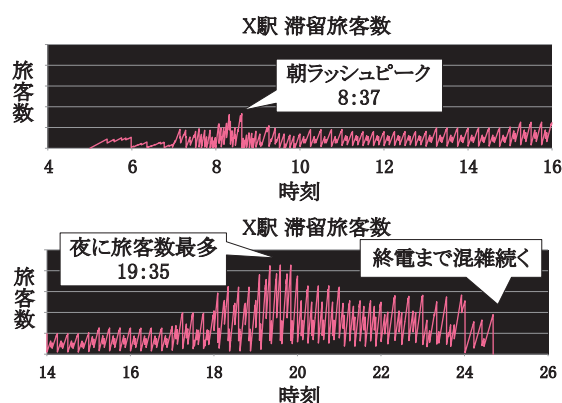


図5 駅滞留旅客数出力例

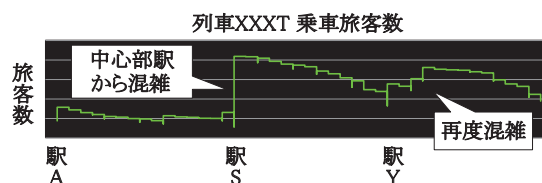


図6 列車乗車旅客数出力例

謝辞

本研究を進めるにあたり、西日本旅客鉄道株式会社の皆様にご協力いただきましたことに謝意を表します。

文献

- 1) 柴田宗典, 奥田大樹, 鈴木崇正: 交通機関の乗継を考慮した幹線鉄道の需要予測モデル, 鉄道総研報告, Vol.28, No.4, pp.47-52, 2014
- 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.20, No.2, pp.17-22, 2008
- 3) 土木学会: 非集計行動モデルの理論と実際, 2002