

# 潜在的な需要を考慮した席種別の需要推計モデルと乗車人数推定シミュレーション

中川伸吾<sup>†1</sup> 柴田宗典<sup>†1</sup> 深澤紀子<sup>†1</sup>

**概要**：我が国の優等列車において、満席や混雑により希望する列車・座席を利用できなかった旅客を含む潜在的な需要を把握できるデータは無い。そこで、鉄道事業者が保有する既存の顕在需要データと、アンケート調査の結果から、座席種別ごとの潜在需要推計モデルと、混雑による旅客の行動変化モデルとを構築した。さらに、これらのモデルを用いて、各列車の乗車人数を推定するシミュレーションシステムを構築した。本稿では、これらのモデルやシステムについて述べるとともに、システムによるシミュレーション結果を、既存の顕在需要データを用いて検証した結果について述べる。

**キーワード**：需要推定，潜在需要，次善策選択行動，優等列車，シミュレーション

## Demand Estimation Models and the Ridership Simulation for Limited Express Trains with Taking Account of Potential Demands

SHINGO NAKAGAWA<sup>†1</sup> MUNENORI SHIBATA<sup>†1</sup>  
NORIKO FUKASAWA<sup>†1</sup>

### 1. はじめに

我が国の旅客鉄道で運行される優等列車（新幹線，特急列車など）の需要把握には、座席予約システムの販売実績，特急券等を回収するなどして行われる優等列車 OD 調査，乗務員の目視による乗車人員報告などのデータが用いられる。しかし、これらはいずれも、座席販売数の制約や混雑のもとで、旅客の本来の希望すなわち潜在需要が一部変化した結果表れた顕在需要である。一方、潜在的な需要とは、混雑等により優等列車の利用を断念した、あるいは本来の希望と異なる列車・座席の利用を選択した旅客を含むものであり、これらを正確に把握することは現実的に不可能である。

潜在的な需要は、旅客ニーズそのものであるといえる。これを把握することは旅客ニーズに即した輸送サービス設定、たとえば列車設定や席種設定（指定席と自由席の配分）のために重要である。そこで我々は、既存の顕在需要データの分析と、アンケート調査を実施して、席種（指定席と自由席の種別）ごとに潜在需要を推定するモデルを構築した。さらに、混雑等に遭遇した旅客の行動変化を表す次善策選択行動モデルを構築し、これらのモデルを組み込んだ乗車人数推定シミュレーションシステムを開発した。これにより、潜在需要が顕在需要にどのように変化するか、すなわち各列車の乗車人数がどのようになるかを推定できる

ようになった。

本稿では、構築したこれらのモデルやシステム、および、システムの推定結果を顕在需要データと比較して検証した結果について述べる。

### 2. 潜在需要推定モデルの構築

#### 2.1 既存の顕在需要データ

潜在需要の推定には、対象となる列車の顕在需要を示すデータが必要である。現在得られている優等列車の顕在需要データは、以下の3種類である[1]。それぞれの特徴は表1のとおりである。潜在需要推定モデルの構築には、これらを元データとして活用した。

##### ①座席予約システムの販売実績

指定席は全て、座席予約システムを通して販売されてい

表 1 各顕在需要データの特徴

	①座席予約システムの販売実績	②優等列車 OD 調査	③乗車人員報告
調査方法	システムから抽出	着券回収など	車掌の目視
得られるデータの種類	OD	OD	調査区間断面の乗車数
対象列車	全日全便	調査対象日の全便	全日全便
対象席種	自由席以外	全席種	全席種
精度に関する短所	販売内容と乗車実態の不一致	定期券利用者等の数え漏れ	目視である

<sup>†1</sup> 公益財団法人 鉄道総合技術研究所  
Railway Technical Research Institute

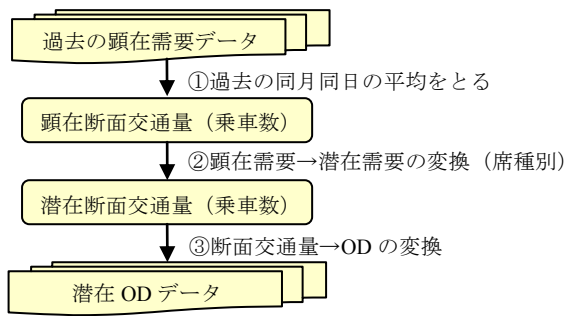


図 1 潜在需要推定モデルのフロー概略

る。このため、座席予約システムで管理しているデータを取り出すことで、全日全便の指定席販売実績を、OD も含めて得られる。なお、OD とは発駅(Origin)・着駅(Destination)の組み合わせ、すなわち旅客の乗車区間のことをさす。販売実績をほぼ正確に把握できることがこのデータの特長である。一方、販売されたとおりに利用されたとは限らないこと、自由席の販売実績は得られないことなどが短所として挙げられる。なお、厳密には、列車内で空席がある際に車掌が指定席を販売することがありえるが、これは極めて稀であるので無視する。

②優等列車 OD 調査

多くの優等列車では、各便各 OD の乗車数を把握する OD 調査が、毎年 1 回平日に行われている。この調査は、駅で降車客の特急券を回収するなどして実施されているものである。

表 2 Web アンケート調査実施概要

調査対象者	以下を全てみたくす人 ①高校生以上、69 歳以下 ②沖縄県を除く 46 都道府県の在住者 ③直近 1 年間に 1 回でも JR の特急列車（新幹線を除く）の利用経験がある
実施期間	2014 年 1 月 30 日～2 月 13 日
回答者数	調査依頼者 8130 人 有効回答数 6036 人（有効回答率 74.2%）

表 3 Web アンケート調査結果：

設問「もし自由席に乗ろうとして以下のような状況だったらどうしますか？」への回答

状況	とる行動	特に気にならない	少し気になるが不快ではない	不快だが我慢して乗る	不快なのでほかの方法を探す（指定席にする、別の列車に乗る、など）
隣も前後も空席，という席に座れる		5307	522	144	63
隣も通路を挟んだ向かいも空席，という席に座れる（ただし前後には人が居る）		4848	941	184	63
隣が空席，という席に座れる（ただし通路を挟んだ向かいや前後には人が居る）		4884	916	187	49
窓側か通路側か好きな方に座れる（ただしどちらにしろ隣も前後も人が居る）		3758	1616	562	100
通路側は空いていないが窓側なら座れる		3357	1854	628	197
窓側は空いていないが通路側なら座れる		3134	1989	743	170
満席で座れない（デッキには人は居ない）		832	714	2388	2102
満席で、デッキも混雑		501	350	1989	3196

指定席のみならず自由席も含めた各 OD の乗車数を、高い精度で把握できることが OD 調査の特長である。一方、定期券利用者などの数え漏れがありうること、調査は通常毎年 1 回しか行われないため季節・曜日等による波動変化の把握には活用できないことが短所である。

③乗車人員報告

乗務員が車内を巡回し、あらかじめ定められた調査対象区間における、席種ごとの乗車人数を目視で数えて記録するものである。各区間の内部で乗降がある場合は、その区間内での最大乗車人数を記録することになっている。全日全便全席種についてデータが揃っており、季節・曜日等による波動変化を把握しやすいことが乗車人員報告の特長である。一方、目視でおおまかに数える調査であるため他のデータに比べて精度が低いこと、把握できるのは調査区間の断面交通量であって OD ではないことが短所として挙げられる。

2.2 Web アンケート調査

自由席に乗ろうとして混雑に遭遇した場合の選択行動について把握し、自由席の潜在需要推定モデル構築に活用する目的で、Web アンケートによる調査を実施した。調査の実施概要は表 2 のとおりである。なおこの調査では、席種選択の実態や要因、特に席種による価格差や混雑情報が席種選択に与える影響などの把握も実施した[2]。

結果を表 3 に示す。混雑していても座れる席がある状況では、座るとした回答がほとんどを占めた。一方で、満席で全く席に空きが無い状況では、利用を回避するとした回答が 35%にのぼり、自由席の利用にあたって着席できるかどうか重視されていることが確認された。

2.3 潜在需要推定モデルの構築

2.1 のデータを活用して潜在需要を推定するモデルを構築した。概要を図 1 に示す。入力、推定対象とする優等列車の過去の顕在需要データであり、出力は、任意の推定

対象日・便における対象優等列車の潜在 OD データである。特に自由席の OD データはわずかしかな存在しないことをふまえて、本モデルでは、以下の方法で乗車人員報告の対象区間における潜在断面交通量を推定し、これを潜在 OD データに変換することとした。

①推定対象日の過去の同月同日（正確には曜日配列を考慮する）における、推定対象便の乗車人員報告の平均を、推定対象日・便の顕在断面交通量とする。

②①で求めた顕在断面交通量を、潜在需要と顕在需要の関係式を用いて、潜在断面交通量に変換する。

③②で求めた潜在断面交通量を、推定対象の優等列車の OD 調査の結果を用いて、潜在 OD データに変換する。

以下、この中で用いる変換の手法について述べる。

**(1) 潜在需要と顕在需要の関係式（自由席）**

自由席については、2.2 の Web アンケート調査の結果から、実際に乗車してきた旅客数（顕在需要）と混雑によって乗車を断念した旅客数（流出需要）との関係を得ることを考えた。まず、窓側のみまたは通路側のみが空いている状況を乗車率 75% と仮定する。これは、一般的な特急列車では、通路を挟んで 2 列ずつ座席が並ぶ形になっているため、図 2 に示すように、窓側が満席、通路側が半分空いている場合は乗車率 75% になるためである。そして、乗車率が 75% 以上 100% 以下のときは、旅客の行動は表 3 の「通路側は空いていないが窓側なら座れる」「窓側は空いていないが通路側なら座れる」の平均をとると仮定する。すると、この状況で乗車しようとする旅客のうち、顕在需要になる旅客と、流出需要になる旅客との比は、以下ようになる。

$$(3357+1854+628+3134+1989+743) : (197+170) = 11705 : 367$$

したがって、乗車率が 75%~100% のとき、流出需要は、顕在需要のうち乗車率 75% を超える分の 367/11705 であると推定できる。

同様に、乗車率が 100% 以上の状態で乗車しようとする旅客のうち、顕在需要になる旅客と、流出需要になる旅客との比は、以下ようになる。

$$(832+714+2388) : 2102 = 3934 : 2102$$

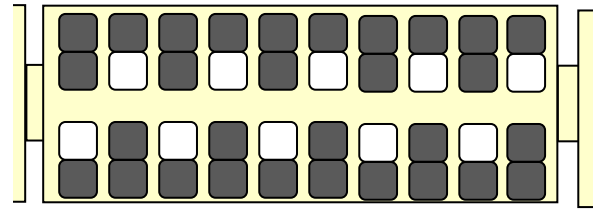
したがって、乗車率が 100% 以上のとき、流出需要は、乗車率が 75%~100% の状態で発生した流出需要と、顕在需要のうち乗車率 100% を超える分の 2102/3934 とを足した数であると推定できる。

以上を用いて、自由席の顕在乗車率と潜在乗車率との関係を定式化できる。グラフ化したものを図 3 に示す。なお、乗車率 75% 以下の場合は流出需要は 0 とみなす。

**(2) 潜在需要と顕在需要の関係式（指定席）**

指定席の潜在需要推定には、自由席と異なり、以下の点で課題がある。

①理論上、乗車率が 100% を超えることはありえない。このため、「実際の乗車率が高い方が潜在需要の多い列車で



灰色は着席している席，白は空席。  
 窓側が満席で通路側のみ空いている場合、通路側の乗車率は 0% 以上 100% 未満であるので、中央値の 50% と仮定すれば全体の乗車率は 75% になる。

図 2 優等列車の通路側のみが空いている状況

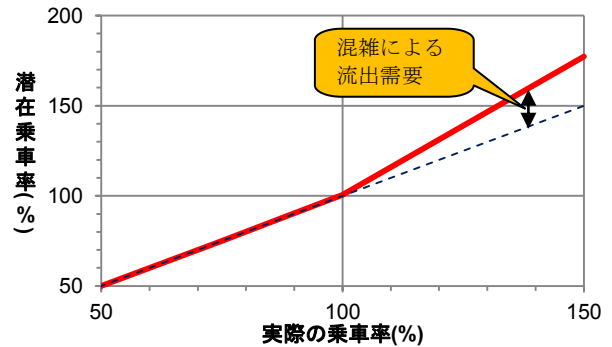


図 3 顕在乗車率と潜在乗車率の関係（自由席）

ある」とは断定できない。

②旅客の乗車希望区間を通じて空いている席が無いと指定席を販売できないため、乗車率が 100% に達しない場合でも OD によっては予約謝絶（満席で販売できないこと）が起こる場合がある。このため、乗車率だけから予約謝絶の有無を判断できない。

③本研究でデータを利用する座席予約システムの仕様上、予約謝絶の記録はほとんど残らない。また、残っている予約謝絶データについても、それが旅客の真の第 1 希望であったかはわからない。このため、座席予約システムの販売実績から予約謝絶の有無や数を判断できない。

以上の点をふまえて、指定席の顕在需要データから潜在需要を推定する方法を検討した。まず、①に示す課題はあるものの、潜在需要の多さ・少なさの根拠となるデータはほかに存在しないため、自由席と同様に、顕在乗車率と潜在乗車率の関係式をつくって潜在需要推定モデルを構築することとした。次に、鉄道事業者へのヒアリングにより、予約謝絶が発生するのは概ね乗車率 85% を超えるときであるとの見解を得た。さらに、ある特急列車の座席予約システムでの販売実績を分析したところ、運行当日の販売が多く、運行前日に 85% を超えるケースはほとんど無かった。これらをふまえて、以下の仮定をおいた。

①顕在乗車率 85% 以下では予約謝絶は起こらず、顕在乗車率が 85% を超える場合は、超える分に対して一定率の予約謝絶がある。つまり、潜在乗車率を  $y$ 、顕在乗車率を  $x$  とすると、以下が成り立つ。

$$y = x \quad (x \leq 0.85 \text{ の場合})$$

$$y = x + p(x - 0.85) \quad (x > 0.85 \text{ の場合. } p \text{ は係数})$$

②流出需要は当日にのみ発生する。

③前日時点での販売数に基づく乗車率と、最終的な潜在乗車率との間には、1次関数の関係がある。

これらの仮定のもとで、顕在乗車率85%以下の列車に対して、前日時点での販売数に基づく乗車率と顕在乗車率(仮定①より、顕在乗車率は最終的な潜在乗車率に等しい)との線形回帰を行い、得られた回帰直線が顕在乗車率85%以上の列車に対してもあてはまるような $p$ を計算した。この $p$ を用いて、顕在乗車率と潜在乗車率との関係を得た。

**(3) 断面交通量を OD データに変換する手法**

2.1 で述べたように、特に自由席に関して OD データの実測値はわずかしかない。そこで、過去の OD データを、潜在断面交通量に合うよう調整することで、潜在 OD データを得ることとした。流れは以下のとおりである。

①推定対象日が平日であれば、推定対象便に関する過去の優等列車 OD 調査の結果を、休日であれば別途実施した同等の調査の結果を、それぞれ基本の OD データとする。なお、この OD データにおける  $i$  駅発  $j$  駅着の乗車人数を  $t_{ij}$  と表す。

②①の OD データにおける各乗車駅に対して、発駅係数  $a_i$  を設定する。これを用いて、求める潜在 OD データの  $i$  駅発  $j$  駅着の乗車人数を  $t_{ij} \times a_i$  であると仮定する (図 4)。

③②で仮定した OD データを断面交通量に変換し、これと潜在断面交通量との二乗誤差が最小になる  $a_i$  を計算する。この  $a_i$  を用いて潜在 OD データを得る。たとえば②で図 4 下のような OD データが得られた場合で、駅 3~駅 4 間の潜在断面交通量が 200 であったとすると、 $100a_1 + 70a_2 + 60a_3$  が 200 に近づくような  $a_i$  を求めることになる。

これは言い換えれば、各乗車駅で乗車する旅客における降車駅別の構成比が、基本 OD データと同じであると仮定して、入力である潜在断面交通量に合うように基本 OD データを調整して潜在 OD データを得る方法である。

**3. 次善策選択行動モデルの構築**

把握した潜在需要を輸送サービス設定等に活用するためには、潜在需要がどのように顕在需要に変化するか、すなわち混雑に直面した旅客の考えを把握する必要がある。そこで、ある特急列車の車内で、旅客を対象に、いま利用中の座席を利用できなかった場合の次善策選択行動に関するアンケート調査を実施した。調査の実施概要は表 4 のとおりである。

結果を表 5 に示す。指定席利用者に対して、「もし指定席が満席だったらどのようにしたと思いますか」と質問した結果、1 本前の指定席・1 本後への指定席への転移がそれ

①基本の OD データ  
 (列車は駅 1→駅 2→...→駅 6 と運行する)

	駅 1 着	駅 2 着	駅 3 着	駅 4 着	駅 5 着	駅 6 着
駅 1 発		10	20	50	20	30
駅 2 発			10	40	10	20
駅 3 発				30	10	20
駅 4 発					30	20
駅 5 発						10
駅 6 発						



②発駅係数をかけた OD データ

	駅 1 着	駅 2 着	駅 3 着	駅 4 着	駅 5 着	駅 6 着
駅 1 発		$10a_1$	$20a_1$	$50a_1$	$20a_1$	$30a_1$
駅 2 発			$10a_2$	$40a_2$	$10a_2$	$20a_2$
駅 3 発				$30a_3$	$10a_3$	$20a_3$
駅 4 発					$30a_4$	$20a_4$
駅 5 発						$10a_5$
駅 6 発						

駅 3~駅 4 間を  
通過する旅客

図 4 基本の OD データから潜在 OD データへの変換

表 4 特急列車内アンケート調査の実施概要

調査対象者	以下を全てみです ①乗車人員報告調査対象区間で対象便に乗車している ②指定席または自由席に着席している ③無賃乳幼児以外
実施期間	2015 年 1 月 17 日~18 日
調査対象便	ある特急列車、両日各 10 便
回答者数	配布数 4194 人 回答数 3905 人 (回収率 93.1%)

表 5 特急列車内アンケート結果：  
満席に遭遇した場合の転移先

	指定席利用者	自由席利用者
1 本前の指定席	261	-
1 本後の指定席	291	209
1 本前の自由席	6	-
その便の自由席	447	1748
1 本後の自由席	15	470
特急利用をやめる	41	93
その他・無効回答	83	241

※自由席では、乗車しようとした時点での選択について尋ねているため、1 本前への転移は選択肢に無い。

それぞれ約 4 分の 1 となり、同じ便の自由席に転移するとした回答が約 4 割であった。特急列車の利用をやめるとした回答は約 4%にとどまった。

また、自由席利用者に対して、「もし自由席に乗車しようとして満席だったらどのようにしたと思いますか」と質問した結果、満席でも乗る、つまり立つことになるのを承知の上で乗るとした回答が約 63%を占めた。これは、2.2 で述べた Web アンケート調査の結果ともほぼ一致しており、妥当性を有すると考えられる。また、1 本待つて自由席に乗るとした回答は 17%、1 本待つて指定席に乗るとした回答は 8%であった。

さらに、この結果を男女や年代等の回答者属性、調査対象便の上下などの旅行属性ごとに分類して、その差が回答に与える影響の有意性を調べるカイ二乗検定を行った。その結果、表 6 に示すように、指定席利用者については年代と同行人数、自由席利用者については年代と利用区間によって、特に強い有意差があるといえることが確認された。この結果をふまえ、乗車人数推定シミュレーションに組み込む次善策選択行動モデルを、これらの要素ごとに構築することとした。一例として、自由席利用者・30 歳代・長距離利用者のモデルを図 5 に示す。なお、自由席利用者の選択肢は図 5 に示す 4 通りであり、指定席利用者の選択肢はこれに「1 本前の指定席に転移」「1 本前の自由席に転移」を加えた 6 通りである。

表 6 特急列車内アンケート結果に対する  
 カイ二乗検定の結果

	指定席利用者	自由席利用者
便	$9.61 \times 10^{-3} *$	0.0023 *
調査日	0.3039	0.4237
上下	0.0401	0.0074 *
調査日×上下	0.2063	0.0803
男女	0.4153	0.5064
年代	$2.17 \times 10^{-3} *$	$1.02 \times 10^{-11} *$
同行人数	$4.11 \times 10^{-3} *$	0.1139
利用区間	0.0168	$1.38 \times 10^{-12} *$

(表中の数字は  $p$  値を表す。\* $p < 0.01$ )

#### 4. 開発した乗車人数推定シミュレーション

ここまで述べたモデルを用いて、乗車人数推定シミュレーションシステムを開発した。本システムの入力は、推定対象とする優等列車の過去の頭在需要データ、推定対象とする日・便（1 便だけとは限らない）およびその席種設定であり、出力は、その対象日・便の頭在 OD データである。流れは以下のとおりである。

①入力した頭在需要データ等から、潜在需要推定モデルを用いて、推定対象日・便の潜在 OD データを得る。これを入力として、②以降に示す、潜在需要が頭在需要に変化する流れの再現シミュレーションを行う。

②潜在 OD データに表れる旅客それぞれに対し、年代・同行人数などの旅客属性を、あらかじめ定めた割合にしたがってランダムに定義する。この属性は、旅客に対して③④でどの次善策選択行動モデルを適用するかを決定するのに用いられる。

③まず、指定席旅客に対して、指定席販売開始以降の時間経過を再現する販売シミュレーションを行う。指定席旅客は、発売実績から推定した売れ進み曲線から得られた分布にしたがって販売窓口に着席し、指定席を購入する。ここで、指定席は先着順で販売されるため、購入しようとした指定席が満席の場合がある。これに遭遇した旅客が発生した場合は、その旅客の行動変化を、3 の次善策選択行動モデルにしたがってシミュレーションする。すなわち、図 6 に示すようなルーレット選択を行い、旅客はその選択にしたがって行動する。ルーレット選択の結果、前後便の指定席への転移が選択された場合は、その転移先の便の指定席の購入を試み、それも不可能だった場合は再びルーレット選択を繰り返す。当該便または前後便の自由席への転移が選択された場合は、その旅客は自由席の潜在 OD に加えられる。需要消失が選択された場合は、その旅客はシミュレ

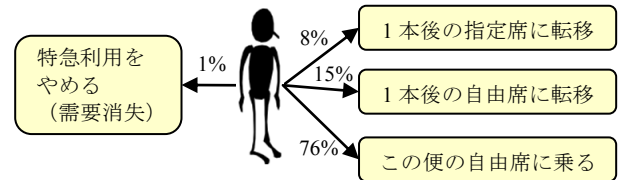
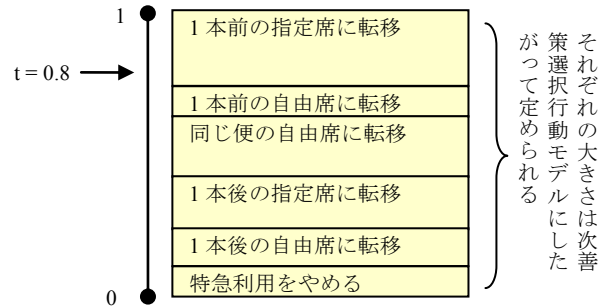


図 5 次善策選択行動モデルの例



$t$  は 0 以上 1 以下の乱数。この例の場合、 $t=0.8$  になったときは「1 本前の指定席に転移」が選択される。

図 6 ルーレット選択

ーションから消える。

④シミュレーション上で、推定対象便の運行当日の始発駅出発時刻になったら、自由席の着席シミュレーションを開始する。自由席旅客は、それぞれの乗車駅でランダムな順番に並んでいると仮定し、列車の各駅到着時刻になったらこの順で着席する。ここで、自由席が満席で着席できなかった旅客が発生した場合は、③と同様に、次善策選択行動モデルにしたがいルーレット選択を行って、その旅客の行動を決定する。

⑤全ての旅客の行動が確定したらシミュレーションを終了し、得られた結果を頭在 OD データとして出力する。

#### 5. 乗車人数推定シミュレーションの検証結果

開発したシミュレーションシステムの精度を検証するため、過去日の OD データを本システムで推定し、これを頭在需要データと比較する検証を実施した。

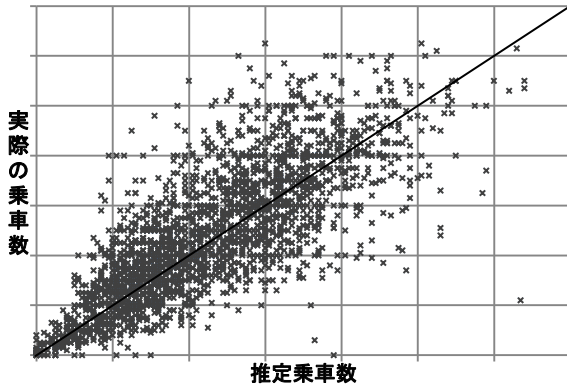


図 7 乗車人数推定シミュレーションの検証結果(指定席)

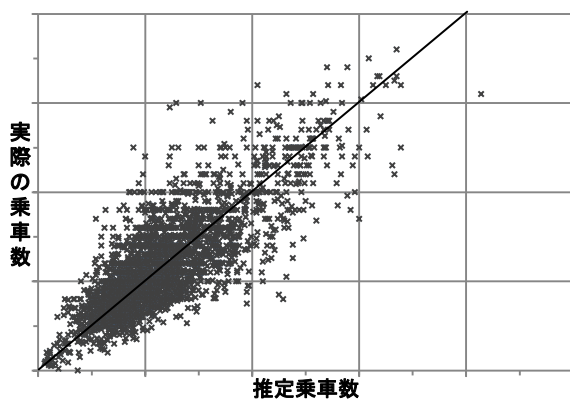


図 8 乗車人数推定シミュレーションの検証結果(自由席)

対象は、2015年4月11日～24日の2週間における、ある特急列車の定期列車全便である。この対象列車のODデータを本システムで推定し、乗車人員報告の調査対象区間の断面交通量に変換して、実際の乗車人員報告と比較した。

結果を図7、図8に示す。若干の外れ値が散見されるものの、指定席では相関係数  $R=0.787$ 、自由席では  $R=0.800$  となり、妥当な推定精度を有することが確認できた。

なお、この推定値は、推定対象日の潜在需要を推定し、さらにそれを推定対象日の席種設定にあてはめて行動変化シミュレーションを行った結果であるので、潜在需要推定モデルと次善策選択行動モデルの2つのモデルを通した出力結果であるといえる。そこで念のため、潜在需要推定モデル単独の精度を確認する目的で、このモデルで推定した潜在ODデータを同様に処理し、実際の乗車人員報告と比較した。これは潜在需要の推定値と顕在需要との比較、すなわちそもそも異なるものの比較であるため参考にしかないが、指定席では  $R=0.780$ 、自由席では  $R=0.797$  となり、潜在需要推定モデルの推定精度に妥当性があると考えられることが示された。

## 6. おわりに

本稿では、既存の顕在需要データとアンケート調査の結果から構築した、座席種別ごとの潜在需要推計モデルと、混雑による旅客の行動変化モデルについて述べ、これらのモデルを用いて構築した、各列車の乗車人数を推定するシミュレーションについて述べた。また、このシミュレーションの結果を、過去日の顕在需要データと比較して検証し、妥当な再現精度を有することを確認した。

この乗車人数推定シミュレーションは主に、一定以上の運行頻度があり、かつ需要流出が起こりうるレベルの混雑がある優等列車において、需要構造の解明に効果を発揮する。さらに、最適化アルゴリズムと組み合わせると、シミュレーション結果を評価し最適化することにより、輸送サービス設定の計画に活用できる。今後はこのような、席種設定計画の最適化に本シミュレーションを活用し、より旅客ニーズに即した輸送サービス設定を実現することで、旅客利便性の向上と鉄道事業者の収益向上との両立を目指していく。

**謝辞** 顕在需要データの入手や分析、および列車内アンケート調査の実施にあたり、ご協力いただいた事業者の皆様へ、謹んで感謝の意を表す。

## 参考文献

- [1] 中川伸吾, 柴田宗典, 尾崎尚也, 深澤紀子, 鈴木崇正. 在来線特急列車における席種別の需要特性に関する基礎分析. 土木計画学研究・講演集, Vol.49 (2014).
- [2] 中川伸吾, 柴田宗典, 尾崎尚也, 深澤紀子, 鈴木崇正. 優等列車の席種設定最適化に向けた旅客需要に関する研究. 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.18, pp.179-186 (2014).