

優等列車の利便性・収益性向上に向けた 席種設定計画手法

中川 伸吾¹・柴田 宗典²・深澤 紀子³

¹非会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 信号・情報技術研究部 交通計画
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:nakagawa.shingo.39@rtri.or.jp

²正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 信号・情報技術研究部 交通計画 (同上)

E-mail:shibata.munenori.51@rtri.or.jp

³正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 信号・情報技術研究部 交通計画 (同上)

E-mail:fukasawa.noriko.11@rtri.or.jp

我が国の優等列車においては、指定席・自由席の配分（席種設定）が旅客ニーズと合致せず、混雑による利便性低下や事業者の収入逸失を招くケースがある。この解決方法として、席種設定を旅客ニーズに合わせて最適化する方法がある。この実現のため、鉄道事業者が保有する既存の顕在需要データの分析と、アンケート調査の結果から、潜在的な需要を考慮した席種別の需要推計モデルと、混雑による旅客の行動変化モデルを構築した。さらに、これらのモデルを組み込んだ需要推計と旅客行動シミュレーション、および遺伝的アルゴリズムによる最適化手法を用い、混雑による需要転移を考慮できる席種設定計画システムのプロトタイプを開発した。ケーススタディの結果、旅客の利便性と鉄道事業者の収益性を同時に向上できる席種設定が得られることが確認できた。

Key Words : potential demand estimation, suboptimal choice behavior, reserved seats, seating plan

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）の普通車では、多くの場合、指定席と自由席の2種類の座席が供給されている。これらの座席種別（以下、席種と称す）ごとの座席数は、多くの場合系統ごとに数パターン設定され、あらかじめ固定的に決められている。しかし、現実の需要には様々な発駅（Origin）・着駅（Destination）の組み合わせ（以下、ODと称す）があり、同じ系統の列車でも季節、曜日、時間帯、区間等により旅客の利用状況は様々である。このため、指定席需要に対して適切に座席を割り当てることができず、予約リクエストへの謝絶や未利用座席が発生し、座席利用率の低下を招く場合がある¹⁾²⁾。同様に、自由席需要に対して十分な座席数を供給できず、混雑による鉄道利用の回避が発生する場合もある。鉄道事業者の視点では、これらの事象は、本来得られるべき収入を逸失するものであり、収益力の低下、ひいては鉄道事業の持続可能性の低下に直結する重要な問題である。

この問題に対しては、増便や車両の増結による輸送力

の向上、需要に応じた柔軟な料金設定による需要ピーク分散といった解決策が考えられる。しかし、前者はダイヤや車両運用が逼迫している場合、特に車両増備への投資が必要になる場合など、現実的に実現不可能である場合がある。後者についても、座席予約システムの改変が必要であることや、旅客のわかりにくさにつながるなどから、鉄道での導入は限定的かつ大雑把なものにとどまっている。

そこで本研究では、この問題に対して、柴田ら³⁾にあるような、席種設定（指定席と自由席の配分）の最適化による解決を目指す。具体的には、近い将来の需要を推定するモデルの構築と、これに基づいて各日各列車の最適な席種設定を提案する計画システムの開発とを目標とする。これは、座席の有効利用、すなわち座席利用率の向上につながるものであり、仮に輸送力の向上施策や需要ピーク分散施策が成功した場合でも、その効果を高める施策として有効である。

この実現にあたっては、過去の実績データ（顕在需要）だけでなく、混雑による利用断念等が起こる前の本来の需要（潜在需要）を考慮する必要がある。なぜなら、潜

在需要とは、もともと鉄道を利用する意思を持っていたが、予約謝絶や混雑の遭遇により鉄道の利用を結果的に回避した旅客を含む旅客ニーズそのものであり、それに対して席種設定を最適化を図らなくてはならないからである。したがって、混雑による潜在需要から実際の需要への変化の定量化も必要である。

そこで本研究では、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た。そして、これらのモデルを用いた乗車人数推定シミュレーションと、数理最適化アルゴリズムを組み合わせた、席種設定計画システムを開発した。ケーススタディにおいて、旅客利便性と事業者収入の双方を同時に改善する席種設定が得られ、席種設定最適化が鉄道の持続可能性の向上に寄与できることを確認した。

2. 潜在需要推定モデルの構築

(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⁴⁾。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すなわち旅客の乗車区間も含めて得られる。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

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
長所	指定席の OD がほぼ正確に得られる	自由席の OD が得られる	全日全便全席種のデータが揃っている
短所	販売実績と乗車実績は必ずしも一致しない	季節・曜日等による波動変化の把握は不可	目視であり他のデータより精度が低い

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考慮しないこととする。

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。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で、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) 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⁵⁾。

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、乗車す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が重視されていることが確認された。

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(ただしどちらにしる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

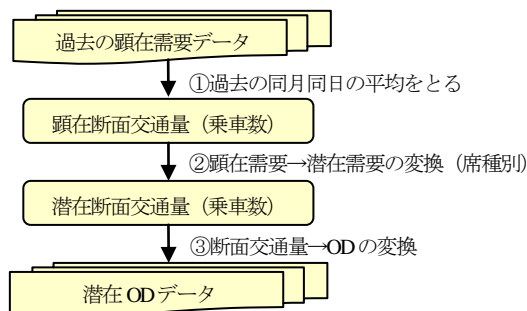
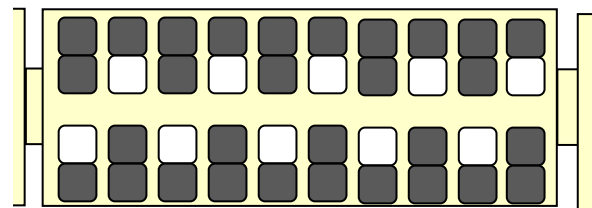


図-1 潜在需要推定モデルのフロー概略



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, 通路側の乗車率を中央値の 50%と仮定すれば, 全体の乗車率は 75%である.

図-2 優等列車の通路側のみが空いている状況

(3) 潜在需要推定モデル

本章で述べた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, 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.

a) 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)のWebアンケート調査の結果から, 実際に乗車できた旅客数(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%の状態が発生した流出需要と, 顕在

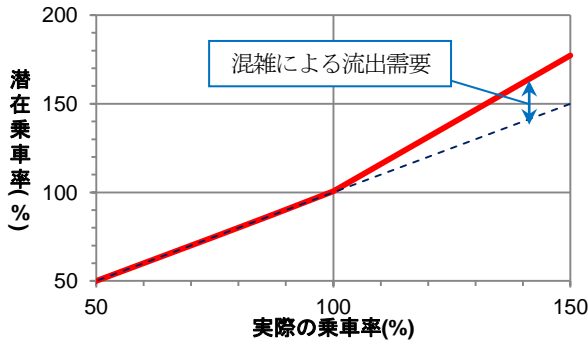


図-3 顕在乗車率と潜在乗車率の関係 (自由席)

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%以下の場合の流出需要は0とみなす。

b) 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。

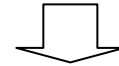
- ①理論上、乗車率が100%を超えることはありえない。このため、「実際の乗車率が高い方が潜在需要の多い列車である」とは断定できない。
- ②旅客の乗車希望区間を通じて空いている席が無く指定席を販売できないため、乗車率が100%に達しない場合でもODによっては予約謝絶(満席で販売できないこと)が起こる場合がある。このため、乗車率だけから予約謝絶の有無を判断できない。
- ③本研究でデータを利用する座席予約システムの仕様上、予約謝絶の記録はほとんど残らない。また、残っている予約謝絶データについても、それが旅客の真の第1希望であったかはわからない。このため、座席予約システムの販売実績から予約謝絶の有無や数を判断できない。

以上の点をふまえ、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、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

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		10 α_1	20 α_1	50 α_1	20 α_1	30 α_1
駅2発			10 α_2	40 α_2	10 α_2	20 α_2
駅3発				30 α_3	10 α_3	20 α_3
駅4発					30 α_4	20 α_4
駅5発						10 α_5
駅6発						

図-4 基本のODデータから潜在ODデータへの変換方法

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。

c) 断面交通量をODデータに変換する手法

(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_1 を計算する。この a_1 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_1 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。

表-4 特急列車内アンケート調査の実施概要

調査対象者	以下を全てみたす人 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。

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。* $p < 0.01$)

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、つまり立つことと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章の(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本待って自由席に乗るとした回答は17%、1本待っ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。

4. 席種設定計画システムとアルゴリズム

開発した席種設定計画システムのフローの概要を図-6に示す。本システムは、推定対象日の各便・各区間の席種設定の組み合わせを解とする遺伝的アルゴリズムを基本としている。ここで、席種設定に対する評価値を算出するためには、潜在需要が席種設定の影響で変化することを考慮する必要があるため、指定席販売や自由席着席を模擬するシミュレーション（以下、販売・着席シミュレーション）を実行する。

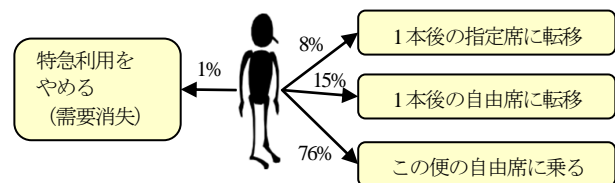


図-5 次善策選択行動モデルの例

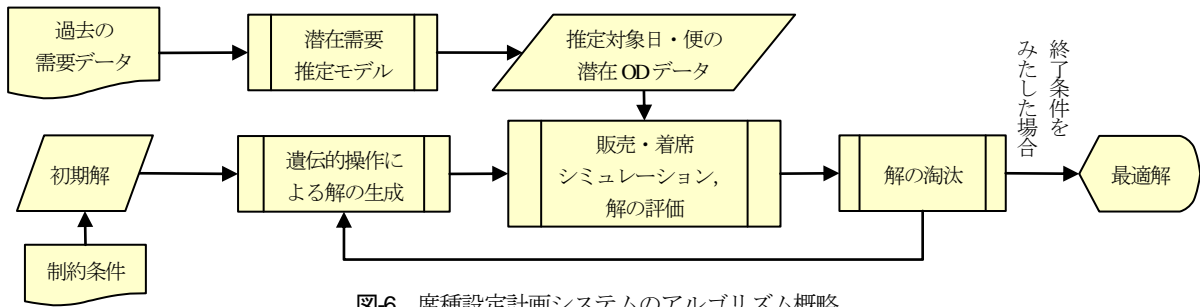


図-6 席種設定計画システムのアルゴリズム概略

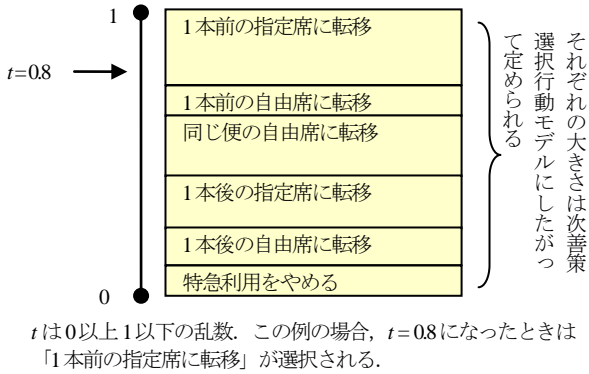


図-7 ルーレット選択の例

レーション) の機能を設け、席種設定に対する実際の乗車人数を推定することとした。

(1) 販売・着席シミュレーション

販売・着席シミュレーションは、ある特定の便を対象に、席種設定と潜在ODデータを入力とし、顕在ODデータを出力するものである。本シミュレーションでは、指定席販売開始時点以降の時間経過を模擬し、各旅客の指定席の購入行動、自由席の乗車待ち状況を再現するものである。シミュレーションの流れは以下のとおりである。

- ①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。この属性にしたがい、各旅客に対してどの次善策選択行動モデルを適用するかを決める。
- ②まず、指定席の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。指定席は先着順で販売される。旅客が購入しようとした指定席が満席だった場合は、その旅客の行動変化を、3章で述べた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-7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。当該便や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ーションから消える。

- ③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、②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。
- ④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、得られた結果を顕在ODデータとして出力する。

(2) 席種設定計画システムのアルゴリズム

開発した席種設定計画システムのアルゴリズムの概要を以下に示す。

- ①2章で述べた潜在需要推定モデルを用いて、過去の需要データから、推定対象日・便の潜在ODデータを推定する。なお、現時点では、この部分は別のプログラムで計算しており、その計算結果を本システムの入力とする形をとっている。
- ②あらかじめユーザが与えた計算条件（各便の初期の席種設定、途中駅での席種設定変更可否など）に基づき、対象便の席種設定（対象便が複数ある場合は、各便の席種設定の組み合わせ）を多数生成する。これらは遺伝的アルゴリズムにおける初期解となる。
- ③生成したそれぞれの解に対して、(1)で述べた販売・着席シミュレーションを行い、顕在ODデータを得る。この顕在ODデータと、それぞれの解とを突き合わせて、評価値を算出する。この評価値に基づき、遺伝的アルゴリズムにしたがって解の生成・淘汰を行う。なお、評価値には、「立席人キロ（最小化）」「指定席と自由席の乗車率差（最

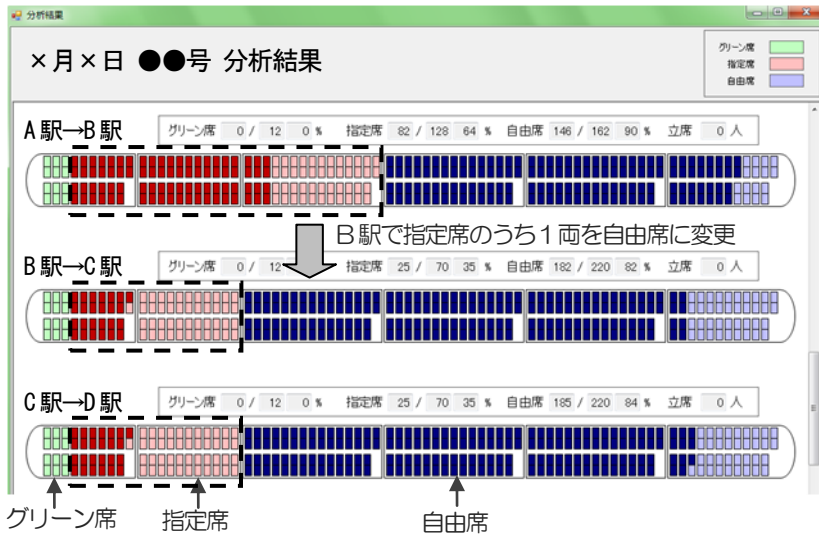


図-8 席種設定計画システムでの解の出力例

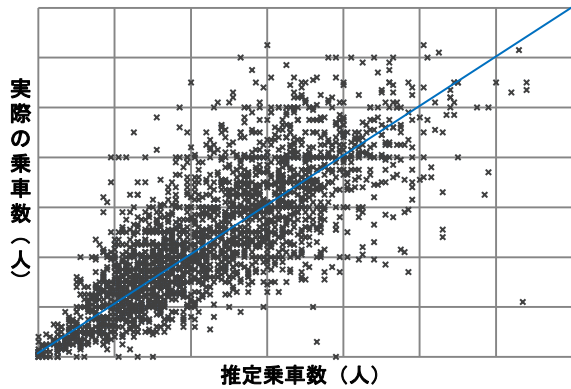


図-9 モデルによる乗車人数推定の精度検証結果 (指定席)

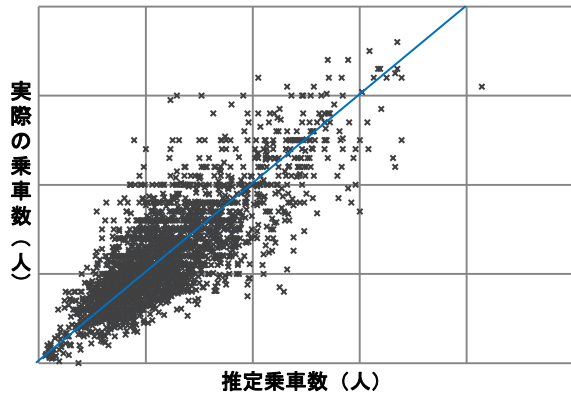


図-10 モデルによる乗車人数推定の精度検証結果 (自由席)

小化)」「乗車率(最大化)」「総収入(最大化)」の4種類のいずれかを設定できる。立席人キロとは、立席で自由席車両に乗車する旅客の利用距離の総和であり、これが大きいほど自由席が混雑して利便性が低下している状態と解釈される。

④以下、③を繰り返す。そして、あらかじめ設定した終了条件(解の進化停止, 世代数上限, 計算時間上限)にしたがって計算を終了し、その時点までに得られた解のうち評価値が最も良い解すなわち

最適解を出力する。

解の出力例を図-8に示す。このように、便・区間ごとの配席図形式で、その時点での乗車人数も併せて表示することで、乗車状況が直感的に理解できるようになっている。ただし、旅客の配席は考慮せず、詰めて着席する形で表示している。

5. 効果等の検証

(1) モデルの精度検証

構築したモデルの精度を検証するため、過去日のODデータを席種設定計画システムで推定し、これを顕在需要データと比較する検証を実施した。

対象は、2015年度のある2週間における、ある特急列車の定期列車全便である。席種設定を各便の現状のものに固定した状態で計算することで、4章(2)で述べたフローの③の時点でこれらの便の顕在ODデータを得られる。この結果を、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-9、図-10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、妥当な現況再現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つのモデルを通じた出力結果であるといえる。そこで、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。この比較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需要同士の比較であるため、参考にとどまるが、指定席では $R=0.780$ 、自由席では $R=0.797$ となった。潜在需要推定モデルによる推定値は妥当であると考えられる。

(2) 席種設定最適化の効果検証

席種設定最適化の効果を検証するため、ケーススタディとして、席種設定計画システムが計算した最適解の評価値と、現状の席種設定のもとでの評価値との比較を行った。対象は2015年度のある平日・休日に運行する、(1)と同じ特急列車の定期列車下り便全便である。それぞれの日について、評価値を「立席人キロ(最小化)」とした場合、「総収入(最大化)」とした場合の2種類の計

表-7 ケーススタディにおける席種設定最適化効果

運行日	立席人キロ最小化 を図った場合		総収入最大化を 図った場合	
	立席 人キロ	総収入	立席 人キロ	総収入
A 日 (平日)	-74.1%	+0.1%	-40.0%	+1.3%
B 日 (休日)	-60.1%	+0.1%	-9.2%	+1.1%

※表中の値は、現状の席種設定のもとでの値との比較

算を行った。

結果を表-7に示す。両日ともに、立席人キロ最小化を図った場合、総収入最大化を図った場合のいずれにおいても、本システムで得られた最適解が立席人キロ減少と総収入向上を同時に実現することが確認された。試算ではあるものの、席種設定最適化の有効性を示す結果となった。

6. まとめ

本論文では、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販売・着席シミュレーションについて述べた。さらに、このシミュレーションと数理最適化アルゴリズムを組み合わせた席種設定計画システムについて述べ、本システムが妥当な現況再現精度を有すること、本システムによる席種設定最適化が旅客利便性向上と鉄道事業者収入向上の両立に寄与できることを示した。

本研究で開発した手法およびシステムは、輸送サービス設定の計画段階において、席種設定変更の効果の定量

化や需要変化の見積もりに活用可能である。これによるサービス改善は、旅客・鉄道事業者双方に有益であり、鉄道事業の持続可能性の向上につながる。実際の列車への施策適用に向けては、旅客案内の方法の確立などの課題があるが、鉄道事業者のご理解ご協力をいただきつつ、実用化を目指していきたい。

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厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 南邦毅, 寺部慎太郎, 家田仁, 水口昌彦: 幹線鉄道における座席配分最適化の研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.27, 2003.
- 2) 鈴木浩明, 黒部久名: 旅客の特急列車における指定席・自由席選択行動の分析, 鉄道総研報告, Vol.7, No.1, pp.59-66, 1993.
- 3) 柴田宗典, 寺部慎太郎, 内山久雄: 都市間優等列車におけるフレキシブルな座席種別設定の効果に関する研究 — 幹線旅客鉄道インフラの更なる高効率利用を目指して —, 運輸政策研究, Vol.13, No.1, pp.2-13, 2010.
- 4) 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.
- 5) 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.

(2016.4.22 投稿)

OPTIMIZATION SYSTEM OF RESERVED/NON-RESERVED SEATING PLANS FOR IMPROVING CONVENIENCE AND REVENUE OF INTER-CITY TRAINS

Shingo NAKAGAWA, Munenori SHIBATA and Noriko FUKASAWA

Seating plans of reserved/non-reserved seats on inter-city express trains are not necessarily correspond to passenger demands which may vary depending on many factors such as calendar days and operating sections. This mismatch possibly cause passengers' inconvenience due to the passenger crowdedness on board and railway operators can lose revenue. Optimizing seating plans is expected to be an effective solution for these problems, where predicting both potential passenger demands and reflections to the potential demand caused by the passenger congestions is necessary. For establishing the prediction methods, we conducted demand analyses and questionnaire surveys. According to these results, we established demand estimation models of reserved/non-reserved seats which can consider potential demands and behavior changes in case that passengers face with congestion. We developed a prototype of seating plan optimization system with applying these models, simulation of passenger's behavior and genetic algorithm. This paper describes these models, the optimization system and the result of applying this system to some existing inter-city express trains as a case study. We got the optimized seating plan which is expected to improve both of the passengers' convenience and the railway operators' revenue.