

優等列車の競争力・収益性向上に向けた 柔軟な席種設定手法

中川 伸吾* 柴田 宗典* 深澤 紀子*

**Optimization System of Reserved/Non-Reserved Seating Plans
for Improving Convenience and Revenue of Inter-city Express Trains**

Shingo NAKAGAWA Munenori SHIBATA Noriko FUKASAWA

Seating plans of reserved/non-reserved seats on inter-city express trains do not necessarily correspond to passenger demands which may vary depending on many factors such as calendar days and operating sections. This mismatch possibly causes passengers' inconvenience due to the congestion which they experience on board and the revenue loss which railway operators can suffer. Optimizing seating plans is expected to be an effective solution for these problems, in which predicting both the potential passenger demands and effect of reflection of passengers who are confronted with the congestion is necessary. We established models representing them and developed a prototype of the seating plans optimization system incorporating these models. As a result of a case study, we got an optimized seating plan which is expected to improve both of the passengers' convenience and the railway operators' revenue.

キーワード：優等列車，席種設定，潜在需要推定，混雑時の選択行動，収益管理

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）の普通車において、指定席と自由席の配分（以下、席種設定と称す）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。一方、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、席種設定と需要の不一致により、指定席の満席や自由席の混雑が発生し、座席利用率の低下^{1) 2)}、旅客利便性の低下が起こる場合がある。鉄道事業者の視点で言えば、これらは、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。

この問題に対する有効な解決策としては、輸送力の増強が考えられるが、ダイヤや車両運用の逼迫などにより、現実的に実現が困難な場合がある。そこで本研究では、柴田ら³⁾にあるような、席種設定の最適化による解決を目指す。これは、仮に輸送力の増強施策が実現できる場合でも、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、実際の需要データ（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、予約謝絶や混雑に遭遇したために結果的に鉄道の利用を回避した旅客を含む、旅客ニーズそのものであり、良い席種設定とはこの潜在需要をみたすものだと言えるからである。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、アンケート調査の結果から、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、席種設定計画システムを開発した。これを用い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

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

* 信号・情報技術研究部 交通計画研究室

特集：輸送計画技術

表1 各頭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	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

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。指定席のみではあるが、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。

(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に注意しなければならない。

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）
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

(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、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

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。入力は、推定対象とする優等列車の過去の頭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 データはわずかしこ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・便の頭在断面交通量とする。
- (2) (1) で求めた頭在断面交通量を、潜在需要と頭在需要の関係式を用いて、潜在断面交通量に変換する。
- (3) (2) で求めた潜在断面交通量を、推定対象列車の

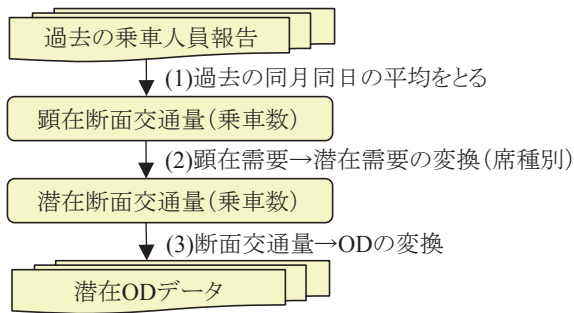


図1 潜在需要推定モデルのフロー概略

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。

2.3.1 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% と仮定し、乗車率がこれ以上で 100% 以下のとき、自由席に新たに乗車しようとする旅客の行動は、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。

同様に考えると、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。

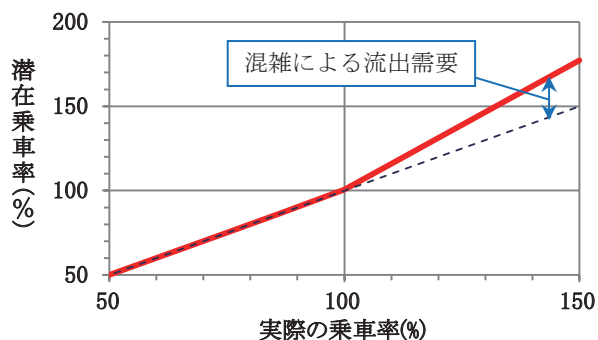


図2 顕在乗車率と潜在乗車率の関係（自由席）

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。その結果を図 2 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。

2.3.2 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) どんなに潜在需要がある場合でも、顕在乗車率は理論上 100% を超えない。また、乗車率が 100% に達しない場合でも、OD によっては満席で販売できないことがある。このため、乗車率だけから予約謝絶の有無や数を判断できない。

(2) 本研究で活用する座席予約システムの仕様上、販売実績データに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、それが旅客の真のニーズであったかはわからない。

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。

2.3.3 断面交通量を OD データに変換する手法

2.3.1 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かった。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。まず、推定対象日が平日

特集：輸送計画技術

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。求める潜在 OD データにおける、各乗車駅で乗車する旅客における降車駅別の構成比は、この基本 OD データと同じであると仮定する。そして、基本 OD データを断面交通量に変換したものと、入力である潜在断面交通量との二乗誤差が最小になるよう、基本 OD データを調整して、潜在 OD データを得る。

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。

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との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。

本アンケートの結果を、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、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3に示す。なお、自由席利用者の選択肢は図3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4に示す。本システムは、推定対象日の各便・各区間の席

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。

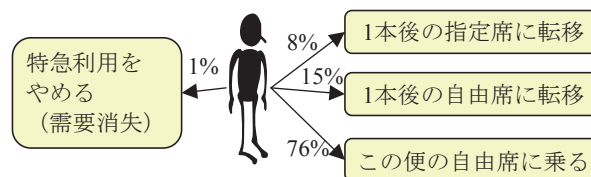


図3 次善策選択行動モデルの例

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と称す）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。

4.1 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。

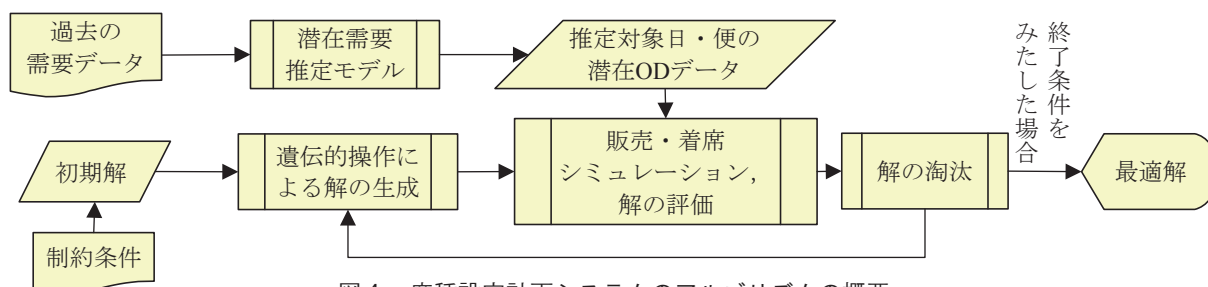


図4 席種設定計画システムのアルゴリズムの概要



図5 席種設定計画システムでの解の出力例

- (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すると仮定する。指定席は先着順で販売される。ここで、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。この場合、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次善策選択を繰り返す。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、結果を顕在ODデータとして出力する。

4.2 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

を図4および以下に示す。

- (1) 2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制約条件（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、前節で述べた販売・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。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。なお立席人キロとは、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と言える。
- (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、計算時間上限など）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。

特集：輸送計画技術

解の出力例を図5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

5.1 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、4.2で述べたアルゴリズムの(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。その結果、若干の外れ値が散見されたものの、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。

5.2 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、前節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種類の計算を行った。

結果を表6に示す。両日ともに、2種類の計算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

表6 席種設定最適化効果（ケーススタディ）

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
ある平日	-74.1%	+0.1%	-40.0%	+1.3%
ある休日	-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

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。

なお、本稿の各章には、公益社団法人土木学会が著作権を保有する文献(6)の抜粋を含む。

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には厚く御礼申し上げます。

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
- 6) 中川伸吾, 柴田宗典, 深澤紀子: 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, 土木計画学研究・講演集, Vol.53, 2016