

特急列車の利便性・収益性向上に向けた 指定席・自由席配分手法

中川 伸吾, 柴田 宗典, 深澤 紀子

新幹線や特急列車においては、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。この問題に対する解決方法として、席種設定を旅客ニーズに合わせて柔軟に変更し、輸送力の利用率向上を図る方法がある。そこで、混雑による需要転移を考慮できる、席種設定の最適化手法を開発した。ケーススタディの結果、旅客の利便性や鉄道事業者の収益性を向上できる席種設定が得られることが確認できた。

キーワード：新幹線，特急列車，席種設定，混雑時の選択行動，混雑緩和，収益最大化

1. はじめに

日本の新幹線や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。一部の例外を除き、指定席と自由席には、座席設備としての差はなく、その配分（以下、席種設定）は運行事業者の輸送サービス施策次第で決定できる。そこで多くの列車では、席種設定は、列車の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、現実の需要は季節、曜日、時間帯、区間などによりさまざまに変化するため、席種設定が旅客ニーズと合致せず、指定席の満席や自由席の混雑により、旅客利便性の低下や鉄道事業者の収入逸失を招くことがある [1, 2]。

この問題は、輸送力の向上、つまり増便や車両増結によって座席数を十分に多くすることで解決できる。しかし、輸送力の向上は、ダイヤ上増便の余地がない、車両や乗務員の運用が不可能、車両増備への投資が莫大になってしまうなどの理由で、現実的に実現困難である場合がある。

そこで本研究では、この問題に対して、席種設定の最適化、すなわち、よりきめ細かい席種設定を策定し、座席の有効利用を図って解決することを目指した。この実現には、乗車実績データには現れない潜在的なものも含めた需要の推定と、混雑などに直面した旅客の需要転移を考慮した列車・席種選択行動のモデル化が

必要である。本研究では、この推定手法とモデルをアンケート調査などに基づき構築したうえで、これらを用いた乗車人数推定シミュレーションを開発した。さらに、このシミュレーションと、遺伝的アルゴリズムによる数理最適化手法を組み合わせ、席種設定計画システムのプロトタイプを開発した。そしてケーススタディにおいて、席種設定最適化が旅客利便性や事業者収入に与える効果を確認した。

2. 最適な席種設定の計算手法

席種設定最適化の計算フローを図1に示す。このフローは、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おり、さらに、需要が席種設定の影響で変化することを考慮するため、(3)で述べるようなシミュレーションを付加している。

(1) 過去の乗車実績に基づき、推定対象日・便の発着区間別の乗車人数（以下、ODデータ）を推定する。なお、推定対象は実際に乗車する人数ではなく、潜在的なものも含めた需要、つまり旅客ニーズそのものとする。

(2) 遺伝的アルゴリズムに基づき、解（席種設定の案）を生成する。

(3) (1)の潜在ODデータと、(2)で生成したそれぞれの解を突き合わせる。解が、潜在ODデータに対して十分な座席を供給するものであれば、潜在ODデータはそのまま乗車実績になる。一方、混雑が発生した場合は、選択を変える旅客がいると想定される。このような、潜在ODデータから乗車実績への変化をシミュレーションする。

(4) (3)で得られた乗車実績を、あらかじめ定めた基

なかがわ しんご, ふかさわ のりこ
公益財団法人鉄道総合技術研究所信号・情報技術研究部
〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38
しばた むねのり
公益財団法人鉄道総合技術研究所構造物技術研究部
〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38

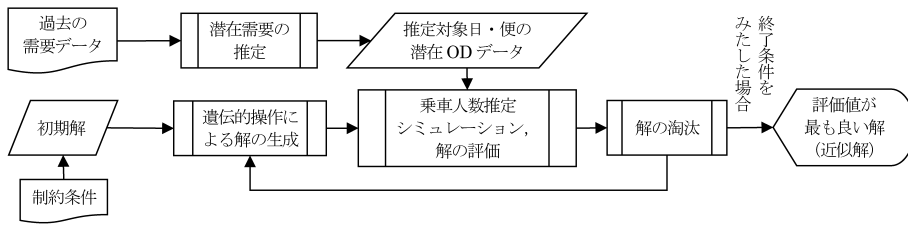


図1 席種設定最適化の計算フローの概略

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
得られるデータの種類の	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	目視でありほかのデータより精度が低い

準（たとえば鉄道事業者の総収入）で評価して、解の評価値とする。この評価値に従って、解の生成・淘汰を行う。

(5) (3)(4)を繰り返し、あらかじめ設定した終了条件に従って計算を終了して、それまでに得られた解のうち評価値が最もよい解（近似解）を出力する。

このフローを実現するには、(1)で述べた潜在 OD データの推定手法、(3)で述べたシミュレーションの手法が必要になる。これらについて、3 節、4 節で述べる。

3. 潜在的な需要の推定手法

潜在需要の推定には、実際の販売・利用実績（頭在需要）を把握して利用することが不可欠である。頭在需要データとしては、表 1 に示す 3 種類が挙げられる。

①「座席予約システムの販売実績」は、予約システムに記録されたデータであり、指定席について、発着区間別の乗車人数（以下、OD データ）や、各日各便の売れ進み状況などのデータが得られる。②「優等列車 OD 調査」は、きっぷの回収などによって OD データを調査するものであり、多くの特急列車で毎年 1 回行われている。③「乗車人員報告」は、特定区間での断面乗車人数を車掌が目視で数えるものであり、特急列車では基本的に全日全便で記録されている。表 1 に示すように、これらのデータにはそれぞれ長所・短所があり、組み合わせて分析しても、自由席の日々の OD

データが得られない、指定席満席・自由席混雑などによる需要の流出や転移が把握できない、といった課題がある。そこで本研究では、潜在的な OD データの推定手法を以下のように構築した。

(1) 需要データの分析により、推定対象日の需要は過去の同月同日（正確には曜日配列を考慮する）の需要に近いことが確認できたため、その日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、すなわち乗車人員報告の調査対象区間での乗車人数とする。

(2) (1)で求めた頭在断面交通量から、潜在断面交通量を推定する。

(3) OD データ調査の結果を、(2)で得られた潜在断面交通量に合うよう最小二乗法を用いて拡大・縮小して、潜在的な OD データを推定する。

ここで、(2)での推定にあたっては、以下のように、頭在断面交通量に基づく乗車率と潜在乗車率との関係を定式化した。

a) 指定席に関しては、実際の指定席販売実績を分析し、特に乗車当日に満席により販売数が少なくなっている状態を抽出して、満席のために指定席購入をあきらめた人数を推定した。詳細は参考文献 [3] を参照されたい。

b) 自由席に関しては、特急列車利用経験がある人を対象に web アンケートを行い、自由席のさまざまな混雑状況を想定したうえでその列車に乗車するかどうかを調査した（回答数 6,036）。その結果、希望に沿わなくても座席がある状態では、乗車しないという回答は最大 3%にとどまった一方、満席状態であれば 35%の旅客が乗車しないと回答した。ここから、満席状態のときに流出する需要を推定した。この結果得られた、頭在乗車率と潜在乗車率の関係を、図 2 に示す。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。詳細は参考文献 [3, 4] を参照されたい。

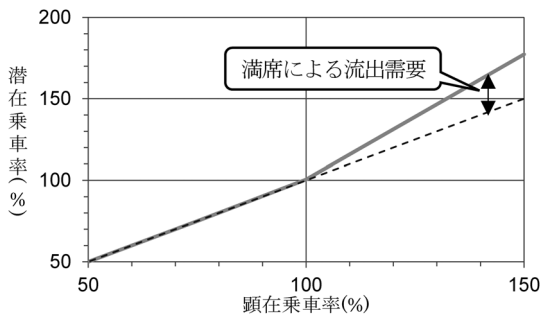


図2 顕在乗車率と潜在乗車率の関係（自由席の場合）

4. 混雑などによる行動変化のシミュレーション手法

4.1 混雑などに直面した旅客の選択行動の調査

十分に座席があれば、潜在需要はそのまま顕在需要になると考えられる。一方、2節の(3)で述べたように、指定席の満席や自由席の混雑に直面した旅客がいる場合は、その旅客が行動を変えることにより、潜在需要と顕在需要には差が生じる。このような行動変化を推定するには、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2のとおりである。

結果を表3に示す。指定席旅客（回答数1,144）に対して、「もし、お持ちの指定席のきつぷを買う時に満席で買えなかったとしたら、どのようにしたと思いますか。」と質問した結果、前後便の指定席への転移が約半数、自由席への転移が約40%となった。

自由席旅客（回答数2,761）に対して、「もし、いまご利用の自由席について、乗車直前に座れないかもしれないとわかったとしたら、どのようにしたと思いますか。」と質問した結果、混雑を承知で乗るとした回答が63%で最も多く、次いで、1本後の自由席17%、1本後の指定席8%となった。

さらに、この結果を男女や年代などの回答者属性、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。この結果を踏まえ、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

表2 特急列車内アンケート調査の実施概要

調査対象者	以下をすべて満たす人 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17~18日
調査対象便	ある特急列車、両日各10便
回答者数	配布数 4,194人 回答数 3,905人（回収率93.1%）

表3 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ない。

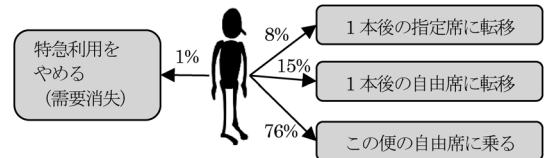


図3 次善策選択行動モデルの例

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、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。これ以外の選択肢は、選択する人が少ないと考えられるため考慮しないこととした。

4.2 乗車人数推定シミュレーション

4.1で述べた次善策選択行動モデルを用いた乗車人数推定シミュレーションを、以下のように構築した。これは指定席の販売開始日以降の時間経過に従ったシミュレーションである。

(1) 指定席旅客が、発売実績から推定した売れ進み曲線に従って販売窓口に着席するという仮定のもとで、指定席の販売シミュレーションを行う。希望する列車の指定席が満席だった旅客は、次善策選択モデルのパラメータに従って行動を変える。ここで前後便の指定席を選択した場合で、その便の指定席も満席の場合は、さらに行動を変える。

(2) 自由席旅客、および(1)で自由席に転移した旅客

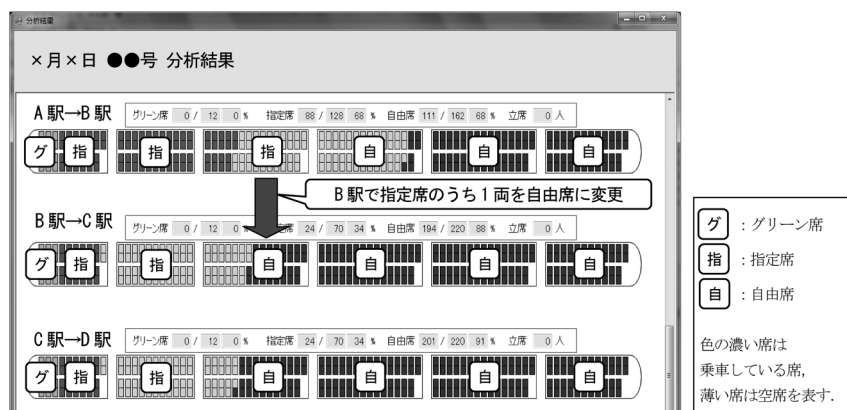


図4 席種設定計画システムでの解の出力例

の着席シミュレーションを行う。これらの旅客は、列車の到着時刻に駅ホームにランダムな順番で並んでいると仮定し、この順に着席する。このとき満席で自由席に着席できなかった旅客は、次善策選択モデルのパラメータに従って行動を変える。

(3) すべ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、得られた結果を乗車実績として出力する。

5. 開発した席種設定計画システム

ここまで述べた手法を搭載した、席種設定計画システムのプロトタイプを開発した。このシステムは、図4のように、近似解を配席図の形式で出力する。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。解の評価尺度(目的関数)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、自由席が満席であるために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、これが大きいほど旅客の利便性が低下していると言える。

6. 乗車人数推定の精度検証

構築した計算フローの妥当性を検証するため、乗車人数の現況再現を実施した。開発したシステムにおいて、席種設定を各便の現状のものに固定した状態で乗車人数推定シミュレーションを行うことで、各便のODデータを推定できる。これを乗車人員報告の調査対象区間の断面乗車人数に変換して、実際の乗車人員報告と比較し、現況再現の精度を確認した。

対象は、ある連続した14日間における、ある特急列車の定期列車全便である。この列車はある大都市と

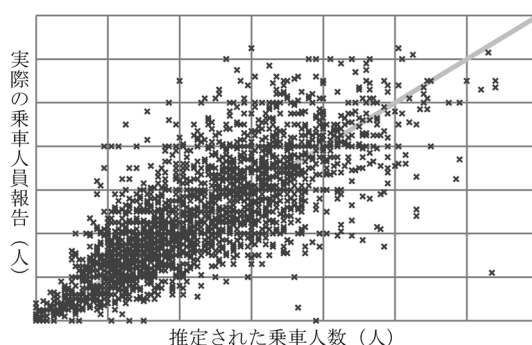


図5 乗車人数推定の精度検証結果(指定席)

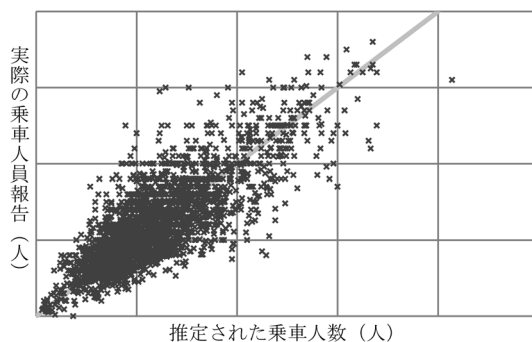


図6 乗車人数推定の精度検証結果(自由席)

地方都市との間を高頻度で運行しており、朝や夕方を中心に慢性的に混雑が起きていることが定性的にわかっている。対象とした14日間は、ある土曜日から翌々週の金曜日までであり、この中に祝日はない。この期間は1年の中で需要が平均的であると考えられる時期であり、また、大きな需要増減が想定されるイベントやアクシデントはなかった。

結果を図5、図6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 $R=0.79$ 、自由席では $R=0.80$ となり、妥当な現況再現精度を有することを

表4 席種設定最適化による増収効果（試算）

	車両単位での設定	列単位での設定
第1日	+0.10%	+0.12%
第2日	+0.16%	+0.20%
第3日	+0.16%	+0.16%
第4日	+0.09%	+0.13%
第5日	+0.10%	+0.11%
第6日	+0.13%	+0.09%
第7日	+0.12%	+0.15%
第8日	+0.09%	+0.12%
第9日	+0.14%	+0.15%
第10日	+0.11%	+0.12%
第11日	+0.14%	+0.15%
第12日	+0.22%	+0.22%
第13日	+0.14%	+0.14%
第14日	+0.13%	+0.08%

※表中の値は、現状の席種設定のもとでの総収入に対する収入増加率である。

表5 総収入増加と立席人キロ減少を両立できた試算結果

	収入増加率	立席人キロ減少率
第10日	+0.06%	-13.2%
第13日	+0.12%	-9.8%

表6 ゴールデンウィークでの増収効果（試算）

	車両単位での設定	列単位での設定
第1日	+0.26%	+0.25%
第2日	+0.13%	+0.11%
第3日	+0.23%	+0.23%
第4日	+0.24%	+0.22%

確認できた。

7. ケーススタディ

席種設定最適化の効果を確認するため、ケーススタディとして、開発した席種設定計画システムが算出した近似解の評価値と、現状の席種設定のもとでの評価値との比較を実施した。対象は6節と同じ特急列車である。1日分の、下り便（大都市から地方都市に向かう便）全便を対象に最適化計算を行った。

7.1 総収入最大化を図った場合

6節で検証対象にした14日間について、総収入最大化を図った計算を行った。席種設定を車両単位で設定する場合、座席の列の単位で設定する場合のそれぞれについて、遺伝的アルゴリズムのパラメータや初期解の生成方法を変えて複数回の計算を行い、それぞれで得られた近似解のうち総収入が最も高いものを、現状の席種設定のもとでの総収入と比較して、収入の増加率を算出した。なお、6節で述べたとおり、計算対

象日の第1日が土曜日であるので、第1日・第2日・第8日・第9日は休日、それ以外は平日である。

結果を表4に示す。席種設定最適化により、概ね0.1~0.2%程度、最も効果の大きい第12日で0.22%の増収効果があることが確認できた。近似解では、現状の席種設定と比べて自由席が減少し指定席が増加しており、指定席を増やして自由席から指定席に転移する旅客を増やすことが収入増加の主要因となっている。なお、一部の日で、列単位より車両単位での設定の方が増収効果が大きくなるという、不自然な結果が得られたが、これは遺伝的アルゴリズムが必ずしも厳密な最適解を得られるものではない点や、列単位での計算の方が解となる遺伝子が長い点に起因すると考えられる。

なお、表4に載せた計算結果より増収効果は劣るものの、14日間のうち2日では、総収入の増加と同時に立席人キロが減少するという、旅客と鉄道事業者の双方にとって好ましい解が近似解として得られるケースがあった。その解を表5に示す。

また、通常より需要が多い時期での効果を確認するため、ゴールデンウィークの4日間についても同じ比較を実施した。その結果、表6に示すように、4日間のうち3日で、通常の時期よりも高い収入増加率が得られた。この3日では自由席から指定席への転移が多く起こっており、これが収入増加率を押し上げていることが確認された。

7.2 立席人キロ最小化を図った場合

立席人キロ最小化を図った計算を行った結果を表7に示す。表内の値は、近似解の立席人キロを現状の席種設定のもとでの立席人キロと比較した、立席人キロの減少率である。計算の対象や条件は、立席人キロ最小化を図った点を除き、7.1と全く同じである。ただし、14日間のうち第1日と第8日は、現状の席種設定のもとでも立席人キロが0であり、最小化の必要がないため計算対象外とした。

第12日では半減程度にとどまるものの、それ以外の日では立席人キロを大きく減らせており、特に12日間のうち4日で立席利用を解消できることが確認された。いずれの日でも近似解では、現状の席種設定を適用した場合と比べて、指定席利用者が減少した一方で自由席利用者が増加していた。自由席を増やすことにより、指定席から自由席に転移する旅客が発生して自由席需要自体は増えたものの、立席が発生していた便では供給座席数の増加により混雑緩和につながったことが確認された。なお、この転移により、総収入では概ね1%前後、最大で1.65%の減収となった。

表7 席種設定最適化による立席人キロ減少効果（試算）

	車両単位での設定
第1日	×
第2日	-100.0%
第3日	-86.7%
第4日	-100.0%
第5日	-93.2%
第6日	-100.0%
第7日	-90.2%
第8日	×
第9日	-84.8%
第10日	-95.6%
第11日	-100.0%
第12日	-48.4%
第13日	-87.1%
第14日	-78.1%

※表中の値は、現状の席種設定のもとでの立席人キロに対する立席人キロ減少率である。なお、「×」は、現状の席種設定のもとでも立席人キロが0のため、計算対象外とした。

8. おわりに

本稿では、普通車において指定席・自由席の2種類の座席が設定されている新幹線や特急列車への適用を目指して開発した、席種設定最適化手法について述べた。この手法には、本研究にて考案した乗車人数推定シミュレーションを付加した遺伝的アルゴリズムを適用しており、ある特急列車を対象としたケーススタディにより、妥当な現況再現精度を有すること、席種設定最適化が旅客利便性向上や鉄道事業者の収入向上に寄

与できることを確認した。この手法は、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。また、この手法は、同様に普通車で2種類の座席が設定されている列車であれば海外の列車にも適用可能である（例として台湾高速鉄道が挙げられる）。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。

本稿は、参考文献 [5] の内容に一部情報を追加して再構成したものである。

謝辞 顕在需要データの入手や分析、および4節で述べた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深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, **27**, I(45), 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, **7**(1), pp. 59-66, 1993.
- [3] 中川伸吾, 柴田宗典, 深澤紀子, “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,” 鉄道総研報告, **30**(8), pp. 23-28, 2016.
- [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, **49**, article number: 171, 2014.
- [5] 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, **53**, pp. 2416-2423, 2016.