

# 中山間地域における乗合タクシーの再評価手法に関する研究

公共システム研究室 藤本 隆志

## 1. はじめに

中山間地域では乗合タクシーを導入している地域が見られる。しかし、多くの地域では顧客数が減少の傾向にあり、乗り合いの必要性が低下している。このため、事業者は乗合タクシーを再評価し、現状を維持する、もしくは乗合を伴わない代替的なサービスに転換するのかの検討が求められる。しかし、どのようなタイミングでの転換が有効かは必ずしも自明ではない。そこで本研究では、包絡分析法(DEA)などのいくつかの方法を組み合わせ、効率性と持続可能性の二つの観点から乗合タクシーを再評価する手法を提案し、代替サービスへの転換の有効性を明らかにする。

## 2. 本研究の構成

乗合タクシーは、顧客が乗り合うという機能と、顧客の乗車時刻を調整する機能という二つの機能を有するため、その代替的なサービスとして後者のみを有する「調整タクシー」、双方がない「通常タクシー」を想定し、転換の有効性を分析する手法を構築する。

この手法の基礎となる情報を導出する数理モデルとして、それぞれのサービスのもとでの運行を再現し、再評価に必要な指標がどのような値になるのかを導出するモデルを混合整数計画法に基づいて開発する(3章)。

このモデルが導出する様々な指標を用いて、乗合タクシーを効率性の観点と持続可能性の観点に基づいて再評価する(4章)。効率性の観点では、それぞれのサービスの効率性をDEAで測り、どのような条件で代替サービスへの転換が有効となるのかを見出す。持続可能性の観点では、サービスの転換によって運転手の不足が生じるのかを予測する回帰モデルを作成し、運転手の不足が生じる可能性を定量的に評価する。

## 3. 運行を再現するための数理モデルの構築

乗合、調整、通常タクシーの運行を再現するための数理モデルを定式化する。以下ではその一部を示す。運転手がどの顧客を運送するのかを、以下のバイナリ変数で表す。ただし、 $i \rightarrow j$ は作業*i*の後に作業*j*を実施することを意味する。なお、ここでの作業とは顧客の乗車や降車である。

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & (\text{運転手}k\text{が}i \rightarrow j\text{の場合}) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases} \quad (1)$$
$$(1 \leq i, j \leq 2n+3, 1 \leq k \leq m)$$

顧客*i*が希望する乗降時刻 $d_i$ と実際の乗降時刻 $t_i$ との差は、一定の許容範囲 $\varepsilon$ に収めなければならない。この条件式は以下ようになる。

$$-\varepsilon \leq d_i - t_i \leq \varepsilon \quad (1 \leq i \leq 2n) \quad (2)$$

目的関数は、タクシーの走行距離、乗合に伴って顧客の乗降時刻をずらす時間(以下では「調整時間」と呼ぶ)ならびに目的地に直行できなくなることによる迂回時間の合計を最小化するとし、走行距離の最小化が他の項目より優先されるように設定する。具体的には、次式で表される。ただし、 $L_{ij}$ は距離、 $\lambda_1, \lambda_2$ は重みである。

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{2n+3} \sum_{j=1}^{2n+3} L_{ij} x_{ijk} + \lambda_1 \sum_{i=1}^{2n} (d_i - t_i) + \lambda_2 \sum_{i=1}^n \{(t_{n+i} - t_i) - (d_{n+i} - d_i)\} \rightarrow \min \quad (3)$$

## 4. 転換の有効性の分析

### 4.1 分析用のデータ

転換の有効性を評価するための分析手法を構築する。その際、その手法を神石高原町のタクシー事業者に適用しながら紹介する。その際、2019年の1か月間のデータを用いる。

### 4.2 効率性の観点での転換の有効性の分析

分析の全体像を示す。前章の数理モデル(以下、「数理モデル」と略す)によって、個々のサービスの生産に関する入出力項目の値が与えられているとする。その上で、i) 効率性を定量化した効率値をDEAでサービスごとに導出する。一般に、乗合タクシーの効率性が低いと他のサービスへの転換の有効性が高くなると考えられる。そこで、ii) 転換が有効となる乗合タクシーの効率値(これを「限界効率値」と呼ぶ)を見出す。さらに、iii) 乗合タクシーの効率値と入出力項目の値について回帰分析を行い、任意の入出力項目の値に対する効率値の推計値(「推計効率値」と呼ぶ)が得られるようにする。最後に、iv) 事業者がシナリオを設定し、そのもとでの入出力項目に対する推計効率値を限界効率値と比較し、前者が後者を下回った場合に転換が有効と判断する。

まずは、i)に関してデータが得られているすべての日における乗合、調整、通常タクシーの効率

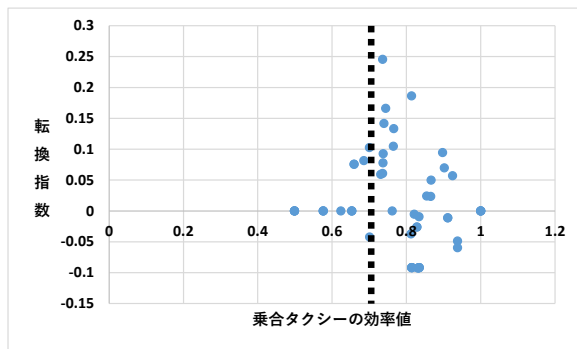


図1 効率値と通常タクシーへの転換指数

表1 回帰分析の結果

説明変数	回帰係数 (t 値)
走行距離／実車距離	0.6001 (26.198)***
調整時間／実車距離	2.285 (3.847)***
(運転手数／実車距離)	
×	1834 (9.392)***
(迂回時間／実車距離)	
切片	0.124 (2.322)*
重決定係数	0.9028

注) \*\*p<0.01 \*p<0.05

表2 シナリオのもとでの推計効率値の結果

運転手数	推計効率値の幅	転換が有効な日数
4人	0.798～0.887	0/3 (日)
3人	0.798～0.907	0/3 (日)
2人	0.798～0.912	0/3 (日)

※1: 「0/3 (日)」とは、3日のうち0日を表す

※2: 限界効率値は0.7

値を導出した。なお、DEAにおける入力項目は運転手数、走行距離、調整時間、迂回時間、出力項目は実車距離である。これ以降、乗合タクシーから通常タクシーに転換する場面に限定して説明する。ii)では転換前後の効率値の差を「転換指数」と呼び、これが正の場合に転換が有効と定義する。神石高原町への適用の結果、乗合タクシーの効率値と転換指数に図1の関係が見られ、効率値が0.7以下の場合に転換指数が常に0以上である。すなわち、「限界効率値」は0.7である。

次いでiii)については、乗合タクシーの効率値の逆数を被説明変数、DEAに用いる入出力項目に基づく指標を説明変数とした。推計の結果を表1に示す。重決定係数が高く良好な結果である。

以上の結果を踏まえ、iv)の検討として、神石高原町において顧客数が9(人/日)に減少したシナリオのもとで転換の有効性を分析する。具体的には、顧客数が9(人/日)の3日間のデータを対象とし、これらの日に運転手が2～4人の場合の推計効率値を求め、それを限界効率値と比較した上で、転換が有効となる日数を求めた。その結

表3 運転手不足が生じる日数

乗合タクシーの運転手数	運転手が不足した日数
4(人)	3/28(日)
3(人)	8/28(日)
2(人)	9/28(日)
1(人)	2/28(日)

表4 ロジスティック回帰分析の結果

説明変数	回帰係数 (z 値)
合成変数	0.0104 (4.619)***
切片	-4.2425(-3.976)***
AIC	51.667

注) \*\*p<0.01 \*p<0.05

表5 シナリオのもとでの運転手不足の結果

運転手数	不足予測値の幅	転換が有効な日数
4人	0.028～0.040	3/3(日)
3人	0.046～0.088	3/3(日)
2人	0.183～0.513	1/3(日)

果を表2に示す。この表より、運転手数によらず転換が有効となる日数は0日であることから、転換は有効でないと判断できる。

#### 4.3 持続可能性の観点での転換の有効性の分析

前節と同様に、数理モデルによって個々のサービスの生産に関する入出力項目の値が与えられているが、その後についてはi)転換により運転手の不足の有無と乗合タクシーの入出力項目の値について回帰分析を行い、任意の入出力項目の値に対する運転手不足の可能性を評価できるようにする。次いで、ii)事業者がシナリオを設定し、そのもとで運転手不足の可能性が一定の値を超過している場合に転換が有効と判断する。

数理モデルを用いた結果、乗合タクシーの運転手数に応じた運転手不足が生じる日は表3のようになった。i)における回帰分析の結果を表4に示す。被説明変数は運転手が不足したか否かを表すバイナリ変数である。説明変数は(走行距離／運転手数)×(顧客数／運転手数)という二つの変数の合成である。的中率を計算すると89.61%であり、良好な結果が得られている。

以上の結果を踏まえ、前節と同じシナリオを与えてii)の検討を行う。その結果を表5に示す。この表の「不足予測値」とは回帰式の被説明変数であり、運転手が不足する可能性の高さを0～1の数値で表しており、この値が0.5を超えると不足が生じる

運転手が3,4人のシナリオでは運転手が不足する日数は0日であり、転換は有効と判断できる。一方で、運転手が2人の場合は、運転手が不足する日数は2日と半数以上になるため、転換は有効ではないと判断できる。