

中山間地域における乗合タクシーの 優位性の評価 — 運転手の人数に着目して —

馮 文浩¹・谷本 圭志²・藤本 隆志³

¹学生会員 鳥取大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: D20T4106C@edu.tottori-u.ac.jp

²正会員 鳥取大学教授 工学部社会システム土木系学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: tanimoto@tottori-u.ac.jp (Corresponding Author)

³学生会員 鳥取大学大学院 持続性社会創生科学研究科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: M21J6026H@edu.tottori-u.ac.jp

中山間地域では公共交通の需要が少ないが、高齢者のように自家用車を運転できない人々にとって公共交通を維持する必要がある。この場面に適した公共交通としては、タクシーがある。しかし、利用者の減少に加えて運転手も不足する傾向にあり、タクシー事業の持続可能性が危ぶまれている。運転手の不足を有効に解決する策として乗合タクシーの導入がある一方、利用者が減少し続けると乗合タクシーの必要性は低くなる。以上を踏まえて、事業者は乗合タクシーの優位性を評価した上で、乗合タクシーと一般タクシーを選択することが求められる。そこで本研究では、運行に必要な最低限の運転手の人数が少ないほど持続可能性に優れているという視点に基づき、乗合タクシーの優位性を評価する手法を提案する。ケーススタディによりその有効性を示す。

Key Words: Shared taxis, Taxi drivers, Rural areas, Mixed Integer programming, Logistic regression model

1. はじめに

多くの中山間地域では路線バスなどの公共交通は不便であり、ほとんどの人々は自家用車を用いて移動している。しかし、高齢者のように自家用車を自由に運転できない人々や自家用車を保有することができない人々にとって、公共交通は生活に不可欠な移動手段である。したがって、需要が少なくても公共交通を維持する必要がある。公共交通には様々なサービスがあるが、少ない需要に適した公共交通としてはタクシーがある。タクシーは、利用者の予約がなければ運行の必要がないという観点で効率的であり、また、あらかじめ決められた時刻やルートがないために乗客のニーズに柔軟に対応できる。加えて、ドアツードアのサービスであるため、徒歩での移動を困難に感じる高齢者にとって便利である。

しかし、中山間地域におけるタクシー事業のビジネス環境は厳しく、多くの事業者は需要と供給の双方の面で困難に直面している。すなわち、中山間地域では人口が

減少している場合が多いことから、需要面については利用者数が減少する傾向にあり、また、供給面については運転手が不足する傾向にある。

運転手が不足する場合の対策の一つが、乗り合いタクシーを導入することである。乗り合いタクシーでは、相乗りが生じるために乗客は自分のニーズ通りに運行してもらうことは期待できない。具体的には、希望する時刻に配車される保証はなく、目的地に直行しない場合もある。このように、事業者の都合に乗客があわせることで、乗合タクシーでは少ない運転手での運行が可能となる。したがって、運転手の不足が懸念される場合には、タクシー事業者は乗合タクシーを導入する動機をもつことになる。

一方で、既に乗合タクシーを導入している事業者も存在する。しかし、乗合タクシーの需要が減少し続けると、乗合タクシーを継続することの意義は乏しくなる。つまり、需要が少なくなると乗客を事業者の都合にあわせてもらう必要性が低くなるため、乗り合いを止めることで

乗客の利便性を改善することができる。したがって、事業者は乗合タクシーから一般のタクシーに転換する動機をもつ。

以上のように、事業者はビジネス環境の変化に応じて乗合タクシーと一般のタクシーのどちらかを選択する必要がある。その際には、乗合タクシーが一般タクシーと比べて優位性を評価する必要がある。しかし、中山間地域における乗合タクシーの優位性を客観的に評価するための手法は見当たらない。

そこで本研究では、実際の運行履歴データを用いて乗合や一般のタクシーの運行に必要な運転者数を算出できる数理計画モデルを混合整数計画法に基づいて定式化する。その上で、このモデルで計算した結果を用いて、運行に必要な最低限の運転手の数が少ないほど持続可能性に優れているという視点から、乗合タクシーの優位性を評価する。具体的には、ケーススタディエリアを対象に、統計モデルを用いて乗合タクシーの優位性を定量的に評価できることを示す。本論文の各章の構成を以下に示す。第2章では、乗合タクシーに関する先行研究をレビューする。第3章では、数理計画モデルの前提条件とモデルの定式化を示す。第4章では、数理計画モデルをケーススタディエリアに適用し、ロジスティック回帰モデルに基づいて乗合タクシーの優位性の評価について議論する。第5章では、まとめと今後の課題を説明する。

2. 既往の研究

都都市を対象とした乗合タクシーの優位性に関する研究にも多くの蓄積がある。都市における乗合タクシーの優位性は、主に走行距離の削減と環境への影響という観点で評価している。Cai *et al.*¹⁾と Yu *et al.*²⁾は北京を対象として、タクシーの運行履歴データを用いて乗合タクシーの優位性を評価した。その結果によると、乗合タクシーで運行することにより一般のタクシーより走行距離を削減でき、大気汚染物質の排出量も減少できることを明らかにしている。Choi *et al.*³⁾は韓国のソウルを対象として乗合タクシーの優位性を評価した。結果から、集客エリアからの48%のトリップが乗りあえ、一回当たりの乗合は1.2kmの走行距離を削減できることが示された。Wang *et al.*⁴⁾はシンガポールを対象に、実際のタクシーの予約データを用いて、シミュレーション研究を行った。一回当たりの乗合をすることで平均2~3kmの走行距離の短縮が可能であることを示した。その他、アメリカのニューヨーク市⁵⁾、中国の上海⁶⁾を対象とする研究もあり、いずれも乗合タクシーの優位性を実証的に示している。

乗合タクシーが車両数の削減をもたらす研究もある。Alonso-Mora *et al.*⁸⁾は13,000台以上の一般のタクシーで対応

している98%の顧客の乗車は定員4の乗合タクシーで3000台だけ対応できることを分析した。また、Vazifeh *et al.*⁹⁾はニューヨークで乗合タクシーで車両数を削減できることを示した。これ以外は乗合タクシーに関して、効率的なアルゴリズムを開発する研究もある¹⁰⁻¹³⁾。

中山間地域における乗合タクシーに関する研究は少ないものの、いくつかの蓄積がある。Eltng *et al.*¹⁴⁾は制約プログラミングを用いて、様々な設定のもとで、サービスできる最大乗客数という観点から乗合タクシーの効率性を評価した。その結果、事前予約が乗合タクシーの効率とサービス質に影響を与えることを明らかにした。Thao *et al.*¹⁵⁾はスイスで実施した乗合交通の実証実験を調査し、どのようなプロセスで乗合交通を導入するのが効果的かについてケーススタディを行った。Lygnerud and Nilsson¹⁶⁾はスイスで実施した乗合交通を対象として、中山間地域における乗合交通のビジネスモデルのあり方についてビジネスモデルキャンパスのフレームワークを用いて検討した。しかし、都市部のように乗合タクシーの優位性を定量的に評価するための研究は見当たらない。また、中山間地域では利用者の減少や運転手の不足という文脈があるが、それに沿った研究も見られない。

そこで本研究では、中山間地域を対象とし、運行に必要な運転手の人数の観点から乗合タクシーの優位性を定量的に評価するための手法を構築する。具体的には、乗合タクシーならびにそれに代替する一般のタクシーについて、運行に必要な最低限の運転手の人数を導出するための数理計画モデルを混合整数計画法で構築するとともに、このモデルで計算した情報を用いた統計モデルを推計することで、一般のタクシーと比較した乗合タクシーの優位性を評価する。すなわち、数理計画モデルと統計モデルを組み合わせた枠組みを提案する。

3. 数理計画モデルの構築

(1) モデルの前提条件

以下の前提に基づいてモデルを構築する。

- 1) 朝の時点で、その日におけるすべての予約を事業者が知っている。
- 2) 乗客はどこで乗降車するかを事業者に伝えて予約をする。
- 3) 事業者は乗客の予約を断らない。すなわち、すべての乗客を運送する。
- 4) 乗合タクシーの場合、車両に複数の乗客が乗り合える。車両には収容できる人数がある。
- 5) 乗合タクシーの場合、乗客が希望する出発時刻より遅くに車両を配車することができるが、事業者は遅れ時間に上限を設けている。

- 6) 乗合タクシーの場合、乗客が乗り合うことによって乗客の運送時間が増加するが、事業者はこの増加分に上限を設けている。
- 7) 一般のタクシーの場合、乗客が希望する時刻通りに個別に運送する。
- 8) 運転手は、車庫がある拠点（以下、「営業所」と言う）で仕事を開始し、営業所にもどって仕事を終える。

(2) モデルの定式化

前節で述べた前提条件に基づいて、乗合タクシーを想定してモデルを構築する。ただし、一般のタクシーは乗合タクシーの特殊な場合として扱うことができる。

運転手は m 人であり、任意の運転手を k で表し、運転手の集合を $K = \{1, 2, \dots, m\}$ で表す。以下では、乗客の運送、運転手の始業、終業をすべて作業という用語で表現する。任意の作業を i で表し、任意の一日に運送する乗客は n 人であるとする。このもとで、乗客の乗車を $N_1 = \{1, 2, \dots, n\}$ 、降車を $N_2 = \{n+1, n+2, \dots, 2n\}$ で表し、すべての乗客に関する作業を $N = N_1 \cup N_2$ とする。なお、 $i \in N_1$ と $n+i \in N_2$ は同一の乗客 i の乗車と降車を表しており、この意味で、 $i \in N_1$ は乗客を識別する番号でもある。このため、以下では、 i は乗客を識別する番号としても用いる。運転手の始業を $i = 0$ で表す。運転手の運送を区別するため、任意の運転手 k の終業を $i = 2n+k$ で表し、終業の集合を $U = \{2n+1, \dots, 2n+m\}$ で表す。すべての作業の集合を $V = \{0\} \cup N \cup U$ で表す。

乗客 i が希望する出発時刻を d_i 、希望する到着時刻を d_{n+i} で表す。以下では、乗客が希望する出発時刻と実際の出発時刻との差を「希望時刻からの乖離」と呼び、これを ε_i で表す。事業者が設定する乖離の上限は ε である。複数の乗客が乗り合うと乗客は目的地に直行できないことがある。直行できないことに伴って要する時間の増加を「所要時間の増加」と呼び、これを λ_i で表す。事業者が設定する所要時間の増加の上限は λ である。乗客が実際に車両を乗車する時刻を t_i 、降車する時刻を t_{n+i} で表す。任意の作業 i から作業 j への移動に要する時間を c_{ij} 、距離を L_{ij} で表す。車両には収容定員があり、これを Q で表す。作業 i の直後における車両の乗車人数を u_i で表す。

モデルの定式化を以下に示す。タクシー事業者は、所与の運転手で走行距離を最小化するものとする。走行距離は事業者にとって最も大きな可変費用と比例の関係にあることから、費用が最小となるように運行するという仮定でもある。ただし、事業者は乗客の利便にも配慮する。具体的には、希望時刻からの乖離、所要時間の増加も最小化する。ただし、これらの最小化は走行距離の最小化よりも優先度が低いものとし、そのことを重みで表す。以上より目的関数を式(1)で表す。ただし、重み

$\omega_1, \omega_2 (\geq 0)$ は第2,3項が第1項と比べてオーダーが小さくなるように設定する。

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} L_{ij} x_{ij} + \omega_1 \sum_{i \in N_1} \lambda_i + \omega_2 \sum_{i \in N_1} \varepsilon_i \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0j} = m \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i, 2n+k} = 1 \quad (\forall k \in K) \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V/U} x_{i0} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in V} x_{2n+k, j} = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{j \in V, j \neq i} x_{ij} = 1 \quad (\forall i \in N) \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V, i \neq j} x_{ij} = 1 \quad (\forall j \in N) \quad (6)$$

$$z_{ik} = z_{n+i, k} \quad (\forall i \in N_1) \quad (7)$$

$$z_{jk} \geq z_{ik} + x_{ij} - 1 \quad (\forall i, j \in N \cup U, \forall k \in K) \quad (8)$$

$$z_{2n+k, k} = 1 \quad (\forall k \in K) \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} z_{ik} = 1 \quad (\forall i \in N \cup U) \quad (10)$$

$$t_j \geq t_i + c_{ij} - M(1 - x_{ij}) \quad (\forall i \in N, \forall j \in N) \quad (11)$$

$$t_{n+i} - t_i \geq 0 \quad (\forall i \in N_1) \quad (12)$$

$$0 \leq t_i - d_i \leq \varepsilon_i \quad (\forall i \in N_1) \quad (13)$$

$$\varepsilon_i \leq \varepsilon \quad (\forall i \in N_1) \quad (14)$$

$$t_{n+i} - t_i \leq d_{n+i} - d_i + \lambda_i \quad (\forall i \in N_1) \quad (15)$$

$$\lambda_i \leq \lambda \quad (\forall i \in N_1) \quad (16)$$

$$0 \leq u_i \leq Q \quad (\forall i \in N) \quad (17)$$

$$u_0 + \sum_{i \in U} u_i = 0 \quad (18)$$

$$u_j \geq 1 + u_i - M(1 - x_{ij}) \quad (\forall i \in V, \forall j \in N_1) \quad (19)$$

$$u_j \geq -1 + u_i - M(1 - x_{ij}) \quad (\forall i \in V, \forall j \in N_2) \quad (20)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (\forall i \in V, \forall j \in V) \quad (21)$$

$$z_{ik} \in \{0,1\} \quad (\forall i \in N \cup U, \forall k \in K) \quad (22)$$

運転手はすべての乗客を運ぶ前に始業を行い、すべての乗客を運送した後に終業を行う。これを式(2), (3)で表す。始業をする前ならびに終業した後に作業はないことを式(4)で表す。事業者はすべての乗客を必ず運送しなければならないことを式(5), (6)で表す。ある乗客を乗せた運転手はその乗客を降ろす運転手であることを式(7)で制約する。作業*i*の次に作業*j*を実施する場合、作業*i*と作業*j*は同じ運転手が担うことを式(8)で制約する。式(9)は、運転手*k*の終業は運転手*k*が担うことを、式(10)は始業を除いたすべての作業は一人の運転手が行うことを表している。

作業*j*の到着時刻は、その作業の直前に行う作業*i*における出発時刻に作業*i*から*j*への移動時間を加えた時刻以降でなければならない。この条件を式(11)で表す。ここで、*M*は十分に大きな値である。乗客の実際の降車時刻は乗車時刻の後である。これを式(12)で制約する。乗客の希望時刻からの乖離と乗客の所要時刻の増加に関する制約を式(13)~(16)で表す。車両には収容定員があることを式(17)で表す。始業と終業は乗客が乗車していないことを式(18)で表す。乗客を乗車させると車両の乗客数が一人増え、降車させると一人減ることを式(19), (20)で制約する。

作業*i*の次に作業*j*を実施するか否かをバイナリ変数 x_{ij} で表す。作業*i*の次に作業*j*を実施する(しない)場合を 1 (0) で表す。作業*i*を運転手*k*が担うか否かをバイナリ変数 z_{ik} で表す。作業*i*を運転手*k*が担う(担わない)場合を 1 (0) で表す。

このモデルに与える運転手の数が少なすぎると、モデルに実行可能解は存在しない。逆に言えば、モデルに実行可能解が存在するための運転手数の最小値が存在する。したがって、運転手の数をパラメトリックに与えてモデルの実行可能解の存在を調べることで、運行に必要な最低限の運転手の数を導出することができる。

4. 統計モデルに基づいた乗合タクシーの優位性の評価

(1) 評価の概要

本章では、前章で構築した数理計画モデルで計算した結果を用いて、運行に必要な最低限の運転手の数が少ないほど持続可能性に優れているという視点から、乗合タクシーの優位性を評価する。その際、ケーススタディエリアを対象に、ロジスティック回帰モデルを用いて乗合タクシーの優位性を一般的に評価できることを示す。

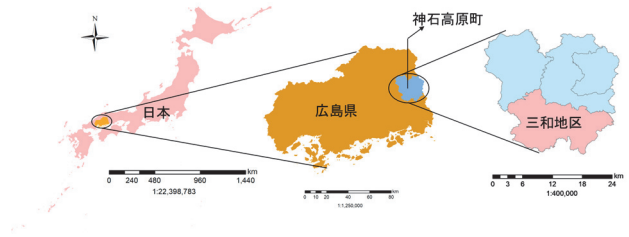


図-1 三和地区の位置^{注1)}

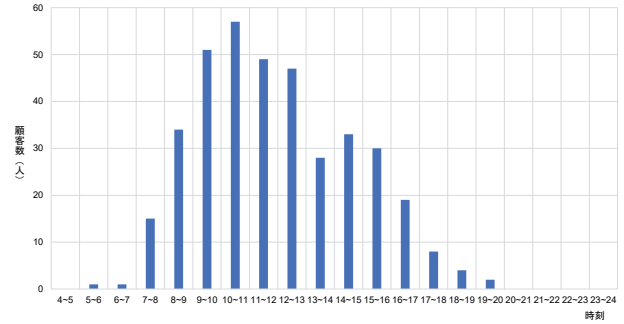


図-2 乗車時刻の分布

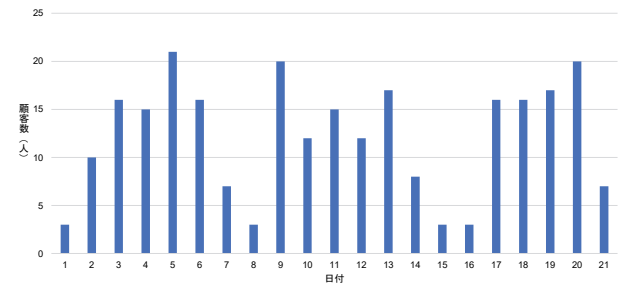


図-3 それぞれの日における乗客数

(2) ケーススタディエリア

広島県神石高原町の三和地区を対象とする(図-1を参照)。三和地区は神石高原町を構成する4つの地区の一つであり、神石高原町における人口の約42%はこの地区に集中している。令和5年1月現在、三和地区の世帯数は1,486世帯、人口は3,504人、高齢化率は約41.8%であり、面積は約127.46 km²である。

(3) 数理計画モデルの計算

1) 乗客のデータ

数理計画モデルの計算に用いるデータについて述べる。以下では、三和地区に営業所があり、主に三和地区で営業しているタクシー事業者の運行履歴データを用いる。履歴データは2019年9月1日から2019年9月21日までの21日間のデータである。履歴データには、日付、乗降車時刻、乗降車地などが記されている。21日間におけるすべての乗客の乗車時刻の分布を図-2に示す。午前

と午後の運送のピークはそれぞれ 10~11 時, 14~15 時であり, 運行に必要な最低限の運転手の人数はこれらの時間帯で決まる. そこで以下では, 9 時~16 時に運送した乗客のデータを抽出し, これらを計算に用いる. それぞれの日に抽出した乗客数を図-3 に示す.

2) 数理計画モデルの設定

分析に用いる距離は道路ネットワーク上での最短距離を与える. 移動時間については, タクシーの平均速度を時速 40km と仮定し, 距離と速度に基づいて算出する. 希望時刻からの乖離の上限については, $\epsilon = 5, 10, 15$ 分という三つの値を設定する. 同様に, 所要時間の増加の上限 λ についても $\lambda = 5, 10, 15$ 分を設定する. このため, ϵ と λ の組み合わせは 9 通りとなるが, 一般のタクシーは $(\epsilon, \lambda) = (0, 0)$ の特殊な場合であることから, 合計で 10 通りを対象として数理計画モデルを適用する. なお, (ϵ, λ) は事業者が乗合タクシーを運用する上で設定する値であることから, 以下ではこれを運用方法と呼ぶ.

計算するすべての日に関して, 時間帯ごとの乗客数の最小値, 平均値, 最大値を図-4 に表す. この図より, 車両に乗り合っても最大で 7 人ほどと推察される. 乗合タクシーではそれ以上の収容定員である車両を用いることも可能であり, 少なくとも日本ではそのような車両を用いる事例が多い. このため, 以下では計算量を削減するため, 収容定員に関する制約式を省いて計算する. 計算に使うソフトは gurobi 9.5.0 であり, Intel® Core™ i7-10750H CPU@2.60GHz 2592Mhz 6core のパソコンで計算を行った. 計算に 24 時間ほど要する日もあるが, その他は 3 時間以内で計算することができた.

3) 運行に必要な最低限の運転手の人数

上記の 10 通りのケースについて, すべての日を対象に運行に必要な最低限の運転手の人数を数理計画モデルで計算した. 図-5 に運用方法 (ϵ, λ) が $(0, 0)$, $(5, 5)$, $(10, 10)$, $(15, 15)$ である場合の計算結果を示す. 以下では, 最低限の運転手の人数を MND (minimum number of drivers) と略し, 上限が (ϵ, λ) であるもとの乗合タクシーのそれを $MND^{st}(\epsilon, \lambda)$, 一般のタクシーのそれを $MND^{nt}(0, 0)$ で表す.

この図から, ϵ, λ の値が大きいほど MND は少なくなることが分かる. また, 一般のタクシーの場合は $MND^{nt}(0, 0) = 5$ となる日がある一方, 乗合タクシーの場合はすべての日について $MND^{st}(5, 5) \leq 4$, $MND^{st}(10, 10) \leq 3$, $MND^{st}(15, 15) \leq 3$ であり, 乗合タクシーにおける最大の MND は一般のタクシーよりも小さい.

それぞれの日における乗合タクシーと一般のタクシーの MND の差を図-6 に示す. $MND^{st}(5, 5) < MND^{nt}(0, 0)$

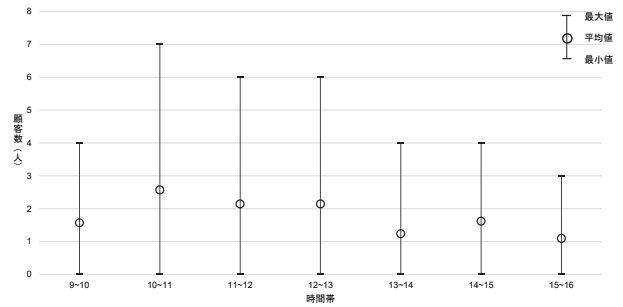


図-4 時間帯ごとの乗客数

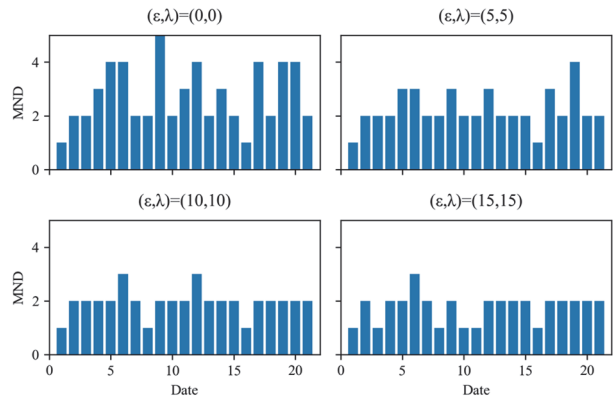


図-5 計算されたMND

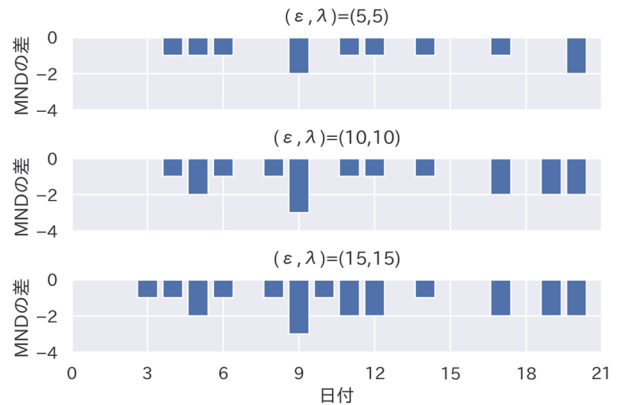


図-6 MNDの差

となる日は 21 日間のうち 9 日間であり, 乗合タクシーの MND は一般のタクシーと比べて 1~2 人少ない. 同様に, $MND^{st}(10, 10) < MND^{nt}(0, 0)$ となる日は 21 日間のうち 11 日間, $MND^{st}(15, 15) < MND^{nt}(0, 0)$ となる日は 21 日間のうち 13 日間であり, これらの日では乗合タクシーの MND は一般のタクシーと比べて 1~3 人少ない. これらの日は, 乗合タクシーが優位である.

一方で, $MND^{st}(\epsilon, \lambda) = MND^{nt}(0, 0)$ の場合は一般のタクシーで十分であり, 乗合タクシーは優位ではない. 図-6 からこのような日を見出すと, $(\epsilon, \lambda) = (5, 5), (10, 10), (15, 15)$ の場合にそれぞれ 12, 10, 8 日ある. これらの日はほとんどが休日である.

以上のように, 数理計画モデルで計算した日について

は、乗合タクシーの優位性を把握することができる。しかし、モデルで計算していない日の優位性は不明である。これらの日はデータがあればモデルで計算して優位性を確認することもできるが、モデルで計算するコストは大きく、多くの時間と労力が必要となる。そこで、限られた日を対象として数理計画モデルで計算し、その結果をサンプルデータとして統計モデルを推計した上で、そのモデルで優位性を評価できれば有用である。次節ではこのアプローチに基づき、ロジスティック回帰分析に基づいた優位性の評価について議論する。

その際、現在は一般のタクシーで運行しているもとの乗合タクシーの優位性を評価する場面と、現在既に乗合タクシーで運行しているもとの乗合タクシーの優位性を評価する場面の二つがあることに着目する。以下では前者をケース A、後者をケース B と呼ぶこととする。

(4) 乗合タクシーの優位性の評価 (ケース A)

1) ロジスティック回帰モデルの推計

数理計画モデルによって、21 日分、10 通りの運用方法の合計 210 サンプルについての計算結果が得られている。そこで、乗合タクシーのMNDが一般のタクシーのそれよりも小さい場合を 1、そうでない場合を 0 とするバイナリ変数を被説明変数としたロジスティック回帰モデルを推計することで、乗合タクシーのMNDが一般のタクシーよりも小さくなる条件、すなわち、乗合タクシーが優位となる条件を導出することができる。

図-5、図-6 を踏まえると、運用方法はMNDの差に影響を及ぼすことから、これらを説明変数に含める必要がある。運用方法の他にもいくつかの指標を説明変数に加えることができる。一つは一日の乗客数である。乗客数が多くても乗合タクシーはMNDが少なく済むという利点があることから、これを説明変数に含めることが適当である。一方、乗客数が多くても、乗客の乗り降りの時間や場所がうまくずれていけば、乗り合わなくてもMNDは小さくなる。このような状況は、運転手一人当たりの実車距離という指標に反映される。ここでの実車距離とは、ある一日に乗客からリクエストがあった出発地から目的地までの最短距離の合計である。乗客の乗り降りの時間や場所がうまくずれていけば、一人の運転手が運送できる距離は大きくなる。つまり、運転手一人当たりの実車距離が大きくなる。したがって、運転手一人当たりの実車距離も説明変数に加えるのが適当である。ただし、本節では、現在は一般のタクシーを運行している場面を想定しているため、実車距離を除く運転手の数は一般のタクシーのMNDである。

以上より、ロジスティック回帰モデルは式(23)-(24)で表すことができる。ただし、 y は被説明変数、変数 p は一日の乗客数、 $odist_D$ は運転手一人当たりの実車距離、

表-1 ロジスティック回帰モデルの推計結果 (ケースA)

説明変数	回帰係数 (z値)
切片	-1.218 (-1.448)
希望時刻からの乖離の上限 (hour)	10.529 (3.814) **
所要時間の増加の上限 (hour)	6.304 (2.391) *
運転手一人当たりの実車距離 (km/人)	-0.186 (-.937) **
乗客数 (人)	0.336 (6.480) **

Note *: p 値 ≤ 0.05 ; **: p 値 ≤ 0.01 ; AIC: 175.17

表-2 ロジスティック回帰モデルでの正解率と再現率 (ケース A)

		予測値			
		1	0	合計	再現率
実際値	1	81	18	99	81.8%
	0	18	93	111	83.8%
	合計	99	111	210	82.9% (正解率)

$\alpha_0 \sim \alpha_4$ はパラメータであり、 X は説明変数のベクトルである。被説明変数 y が 1 か 0 かは数理計画モデルで計算される変数、 ε と λ は数理計画モデルを計算する際に与える変数、 p と $odist_D$ は数理計画モデルに与えるデータから把握できる変数である。

$$Pr(y = 1|X) = \frac{1}{1 + \exp(-f(X))} \tag{23}$$

$$f(X) = \alpha_0 + \alpha_1\varepsilon + \alpha_2\lambda + \alpha_3p + \alpha_4odist_D \tag{24}$$

210 件のサンプルデータを用いて、ロジスティック回帰モデルを推計した。その結果を表-1に示す。切片を除いては、5%の水準でどの説明変数も統計的に有意である。パラメータの符号は上記の仮説の通りであり、妥当な結果を得ている。回帰モデルの正解率、再現率を表-2に示す。正解率は 82.9%、被説明変数が 1 の場合の再現率は 81.8%、0 の場合のそれは 83.8%である。

以上より、 $f(X)$ が正の場合には一般のタクシーに比べて乗合タクシーのMNDが小さいと期待でき、乗合タクシーが優位と言える。一方で、 $f(X)$ が負の場合は、乗合タクシーは優位ではない。

2) 乗合タクシーの運用方法

ロジスティック回帰モデルの推計結果は、乗合タクシーの優位性は運用方法に依存することを示している。したがって、どのような運用方法を設定すると乗合タクシーが優位となるのかについても回帰モデルで求めることができる。以下ではその方法について述べる。

図-7は、横軸を一日の乗客数、縦軸を運転手一人当たりの実車距離とする二次元座標系に 21 日分のデータをプロットしたものである。ただし、青いプロットは休日、オレンジ色のプロットは平日のデータである。ここで、

$f(X)$ が0である場合、すなわち、次式が成立する場合に、一般のタクシーと乗合タクシーの優位性は無差別であることに着目する。ただし、 $\alpha_0^* \sim \alpha_4^*$ は推計されたパラメータである。

$$\alpha_3^* cus + \alpha_4^* odist_P = -(\alpha_0^* + \alpha_1^* \varepsilon + \alpha_2^* \lambda) \quad (25)$$

この式で表される直線を決定境界(decision boundary)と呼ぶことにする。運用方法 (ε, λ) が(5,5),(10,10),(15,15)である場合の決定境界を図-7に重ねて描いたのが図-8である。決定境界の下方に位置するプロットは乗合タクシーが優位であり、上方に位置するプロットは優位ではない。

図-8より、運用方法を $(\varepsilon, \lambda) = (5,5)$ と設定した場合、休日におけるすべてのプロットに関しては乗合タクシーの優位性が認められないため、乗合タクシーは平日のみに運行するのが適当である。一方、平日については乗合タクシーが優位なプロットとそうでないプロットが混在している。このため、この運用方法のもとではMNDが少なくなるという乗合タクシーのメリットを享受できる日が限定的であり、乗合タクシーは必ずしも適当ではない。 $(\varepsilon, \lambda) = (10,10)$ と設定した場合も同様である。 $(\varepsilon, \lambda) = (15,15)$ と設定した場合は、平日におけるほぼすべてのプロットは乗合タクシーが優位であり、乗合タクシーのメリットを享受できる。休日におけるいくつかのプロットは乗合タクシーが優位となるが、その数は限定的であることから、一般のタクシーが適当である。以上より、休日に一般のタクシー、平日には運用方法を $(\varepsilon, \lambda) = (15,15)$ とした乗合タクシーとするのが適当である。このように、回帰モデルを用いることで、乗合タクシーの優位性を評価することにとどまらず、乗合タクシーの利点を享受できる運用方法や、乗合タクシーと一般のタクシーの使い分けを求めることもできる。

(5) 乗合タクシーの優位性の評価 (ケース B)

1) ロジスティック回帰モデルの推計

前節と同様に、数理計画モデルによって 210 サンプルについての計算結果が得られているものとし、ロジスティック回帰モデルを推計することで乗合タクシーが優位となる条件を導出する。

被説明変数は一般のタクシーのMNDが乗合タクシーのMNDより大きい場合を1、そうでない場合を0とするバイナリ変数である。1の場合には乗合タクシーから一般のタクシーに代替するとMNDが増えるため、乗合タクシーが優位である。説明変数には、乗合タクシーから一般のタクシーに代替するとMNDが増える可能性が高い状況を表す変数を選ぶ必要がある。そのような状況とは、乗り合いの機能を発揮している状況と考えられる。したがって、その状況を示す指標を説明変数にすることがよ

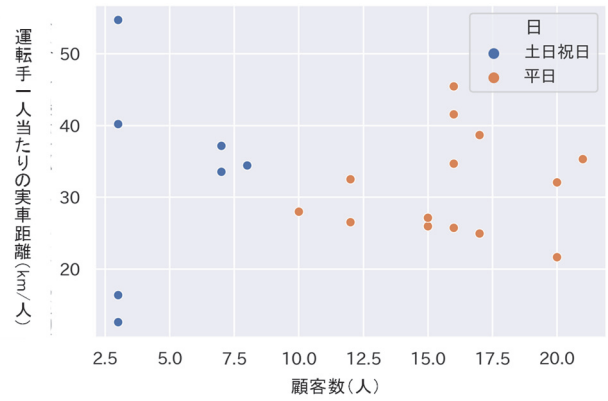


図-6 運転手一人当たりの実車距離と乗客数

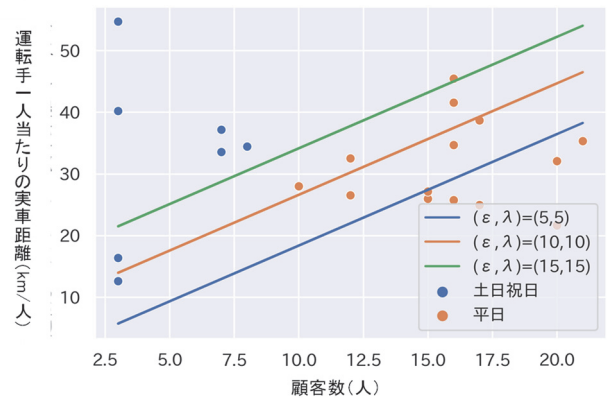


図-7 運用方法と決定境界

いと考えられる。

具体的には、運用方法を説明変数に含めることが考えられる。運用方法は乗合タクシーの場合にのみ設定され、この値が大きいほど乗合タクシーのMNDが小さくなることは先述の通りである。また、運転手の負荷が大きな状況も乗り合いの機能が発揮する場合であり、その具体的な指標として一日当たりの乗客数、運転手の一人当たりの走行距離が考えられる。以上より、運用方法、一日当たりの乗客数、運転手の一人当たりの走行距離を説明変数とする。ただし、ここでは現在は乗合タクシーを運行している場面を想定しているため、走行距離を除く運転手の数は乗合タクシーのMNDである。

以上より、ロジスティック回帰モデルは、式(23)、(24)の $f(X)$ を次式の $g(X)$ に置換したモデルとなる。ただし、 $tdist_D$ は運転手一人当たりの走行距離、 $\beta_0 \sim \beta_4$ はパラメータである。説明変数 $tdist_D$ は数理計画モデルで計算される変数である。

$$g(X) = \beta_0 + \beta_1 \varepsilon + \beta_2 \lambda + \beta_3 cus + \beta_4 tdist_D \quad (26)$$

ロジスティック回帰モデルの推計結果を表-3に示す。すべての変数は5%の水準で統計的に有意である。パラ

表-3 ロジスティック回帰モデルの推計結果 (ケース B)

説明変数	回帰係数 (z 値)
切片	-6.238 (-6.506)**
希望時刻の乖離の上限値(hour)	6.395 (2.706)**
所要時間の増加の上限値(hour)	4.766 (2.075)*
運転手一人当たりの走行距離(km/人)	0.028 (5.777)**
乗客数 (人)	0.195 (3.159)**

Note *p 値<0.05; **:p 値<0.01; AIC: 217.83

表-4 ロジスティック回帰モデルでの正解率と再現率 (ケース B)

		予測値			
		1	0	合計	再現率
実際値	1	73	26	99	73.7%
	0	26	85	111	76.6%
	合計	99	111	210	75.2% (正解率)

メータの符号は上記の仮説の通りであり、妥当な結果を得ている。回帰モデルの正解率、再現率を表-4 に示す。正解率は 75.2%、被説明変数が 1 の場合の再現率は 73.7%、0 の場合のそれは 76.6% である。

以上より、 $g(X)$ が正の場合には一般のタクシーで運行したら MND が増えると考えられる。すなわち、乗合タクシーは優位である。一方で、 $g(X)$ が負の場合は乗合タクシーが優位ではない。

2) 乗合タクシーの運用方法

ロジスティック回帰モデルの推計結果は、乗合タクシーの優位性は運用方法に依存すること示している。このため、前節と同様、どのような運用方法を設定すると乗合タクシーが優位となるのかについても回帰モデルで求めることができる。以下ではその方法について述べる。

一般のタクシーと乗合タクシーの優位性の決定境界は式(27)で表される。ただし、 $\beta_0^* \sim \beta_4^*$ は推計されたパラメータである。

$$\beta_3^* cus + \beta_4^* tdist_D = -(\beta_0^* + \beta_1^* \epsilon + \beta_2^* \lambda) \quad (27)$$

運用方法が $(\epsilon, \lambda) = (5, 5)$ の場合に、横軸を一日の乗客数、縦軸を運転手一人当たりの走行距離とする二次元座標系に 21 日分のデータをプロットし、決定境界を描いたのが図-9 である。運用方法が異なると運転手一人当たりの走行距離が異なり、プロットの位置が変わるため、運用方法が $(\epsilon, \lambda) = (5, 5)$ ではない場合の決定境界を図-9 に描くことはできない。そこで、運用方法が $(\epsilon, \lambda) = (10, 10), (15, 15)$ の決定境界を図-10, 図-11 に別途表す。決定境界の上方に位置するプロットは乗合タクシーが優位であり、下方に位置するプロットは優位ではない。図 9~11 より、休日におけるほとんどのプロットは決定境界の下方に位置しているため、乗合タクシーは優位では

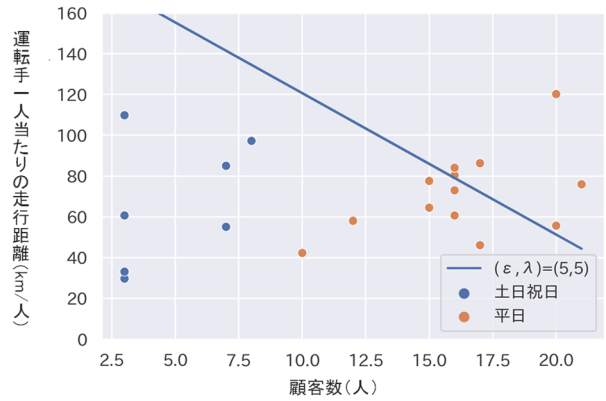


図-8 決定境界(運用方法 : $(\epsilon, \lambda) = (5, 5)$)

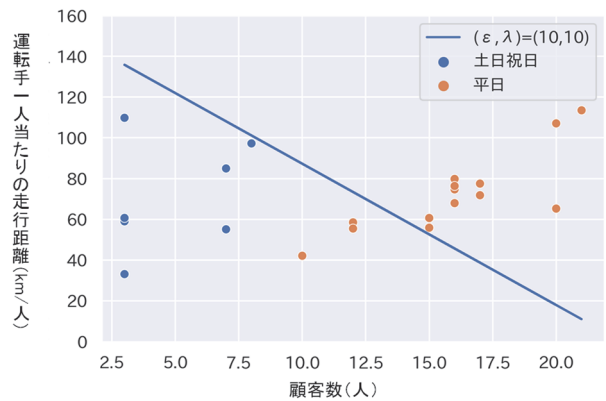


図-9 決定境界(運用方法 : $(\epsilon, \lambda) = (10, 10)$)

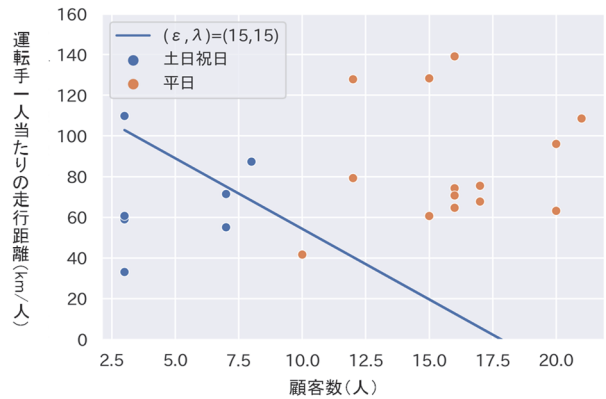


図-10 決定境界(運用方法 : $(\epsilon, \lambda) = (15, 15)$)

ない。このため、以下では休日は一般のタクシーが適切であるとし、平日を中心に議論する。

運用方法を $(\epsilon, \lambda) = (5, 5)$ と設定した場合、平日については乗合タクシーが優位なプロットとそうでないプロットが決定境界の両側にほぼ均等に分布しているため、乗合タクシーが優位とは言えない。このため、運用方法を $(\epsilon, \lambda) = (5, 5)$ とするのは適切ではない。一方、 $(\epsilon, \lambda) = (10, 10)$ と設定した場合は 3 日、 $(\epsilon, \lambda) = (15, 15)$ と設定した場合は 1 日を除いては乗合タクシー

が優位である。このため、 $(\epsilon, \lambda) = (15, 15)$ とすることが適切である。ただし、この運用方法のもとでは休日では一般のタクシーが優位ではない日が2日生じる。このため、平日と休日を総合的に勘案すると、 $(\epsilon, \lambda) = (10, 10)$ であってもよい。

5. まとめ

本研究では、中山間地域では利用者が減少するとともに、運転手の不足する傾向があるという背景のもとで、事業者が乗合タクシーと一般のタクシーのどちらかを選択する場面に着目した。その選択においては、乗合タクシーが一般タクシーと比べて優位かを評価する必要があることから、MNDが少ないことが持続可能性の観点で優れているという視点に基づき、乗合タクシーの優位性を客観的に評価するための手法を提案した。具体的には、実際の運行履歴データを用いて、乗合や一般のタクシーの運行に必要な運転者数を算出できる数理計画モデルを混合整数計画法に基づいて定式化した。その上で、このモデルで計算した結果を用いて、統計モデルを用いて乗合タクシーの優位性を評価できることをケーススタディによって示した。

これらの一連の研究により、数理計画モデルの適用によって個々の日における乗合タクシーの優位性が評価できること、乗合タクシーの運用方法の設定によって乗合タクシーの優位性が異なることを示すことができた。さらに、ロジスティック回帰モデルを用いることで乗合タクシーが優位となる条件を一般的に導出することができ、数理計画モデルと統計モデルを組み合わせることで大量の計算をせずとも優位性を評価できる枠組みを提案することができた。特に、回帰モデルを用いることで、乗合タクシーの評価にとどまらず、その利点が発揮できるような運用方法の設定や、乗合タクシーと一般のタクシーの使い分けを分析することも可能であること示した。

ロジスティック回帰モデルの推計においては、ケースAでは切片が有意とはならず、また、ケースBでは再現率および正解率がケースAに比べて劣るという結果となった。これについては、数理計画モデルのサンプルの生成数が不十分である、他に含めるべき説明変数があるなどの理由が考えられる。今後はこの点を検証し、統計モデルの精度を改善することが必要である。

本研究では、一般のタクシーは乗合タクシーの運用方法が $(\epsilon, \lambda) = (0, 0)$ という特殊なケースと位置付けたが、実際には一般のタクシーであっても、事業者が乗客の希望時刻と異なった配車時刻を乗客に提案することで運送を成立させることもある。すなわち、一般のタクシーについては必ずしも $\epsilon = 0$ ではない。したがって、本研究では

乗合タクシーにとって楽観的な評価となっている。一般のタクシーに関して $\epsilon = 0$ の仮定を緩めることで乗合タクシーが優位となる条件がどのように変わるのかに関する検討も今後の課題である。

今回は、一つのケーススタディエリアを対象としたが、異なる複数のエリアで評価を行い、今回と同様の統計モデルが推計できるかについても重要な論点である。地域の規模や需要のパターンによっては異なった結果となる可能性もあり、ここで得られた知見のどこまでが一般的な知見であるのかを確認することも残された課題である。

謝辞：本研究はJSPS科研費JP20H02276の助成を受けた。付して謝辞と致します。

脚注：

注1) 行政区域データ（国土数値情報，国土交通省）を加工して作成した。

https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N03-v3_1.html. Accessed February 20, 2023.

REFERENCES

- 1) Cai, H., Wang, X., Adriaens, P., & Xu, M. (2019). Environmental benefits of taxi ride sharing in Beijing. *Energy*, 174, 503–508.
- 2) Yu, B., Ma, Y., Xue, M., Tang, B., Wang, B., Yan, J., & Wei, Y. M. (2017). Environmental benefits from ridesharing: A case of Beijing. *Applied Energy*, 191, 141–152.
- 3) Choi, J., Kim, Y., Kwak, M., Park, M., & Lee, D. (2023). Measuring taxi ridesharing effects and its spatiotemporal pattern in Seoul, Korea. *Travel Behaviour and Society*, 30, 148–162.
- 4) Wang, Y., Zheng, B., & Lim, E. P. (2018). Understanding the effects of taxi ride-sharing — A case study of Singapore. *Computers, Environment and Urban Systems*, 69, 124–132.
- 5) Santi, P., Resta, G., Szell, M., Sobolevsky, S., Strogatz, S. H., & Ratti, C. (2014). Quantifying the benefits of vehicle pooling with shareability networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(37), 13290–13294.
- 6) Barann, B., Beverungen, D., & Müller, O. (2017). An open-data approach for quantifying the potential of taxi ridesharing. *Decision Support Systems*, 99, 86–95.
- 7) Yan, L., Luo, X., Zhu, R., Santi, P., Wang, H., Wang, D., Zhang, S., & Ratti, C. (2020). Quantifying and analyzing traffic emission reductions from ridesharing: A case study of Shanghai. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 89(November), 102629.
- 8) Alonso-Mora, J., Samaranayake, S., Wallar, A., Frazzoli, E., & Rus, D. (2017). On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(3), 462–467.
- 9) Vazifeh, M. M., Santi, P., Resta, G., Strogatz, S. H., & Ratti,

- C. (2018). Addressing the minimum fleet problem in on-demand urban mobility. *Nature*, 557(7706), 534–538.
- 10) Simonetto, A., Monteil, J., & Gambella, C. (2019). Real-time city-scale ridesharing via linear assignment problems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 101, 208–232.
- 11) Hua, S., Zeng, W., Liu, X., & Qi, M. (2022). Optimality-guaranteed algorithms on the dynamic shared-taxi problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 164.
- 12) Liang, X., Correia, G. H. de A., An, K., & van Arem, B. (2020). Automated taxis' dial-a-ride problem with ride-sharing considering congestion-based dynamic travel times. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 112(March 2019), 260–281.
- 13) Zhan, X., Szeto, W. Y., Shui, C. S., & Chen, X. (Michael). (2021). A modified artificial bee colony algorithm for the dynamic ride-hailing sharing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 150(May), 102124.
- 14) Elting, S., & Ehmke, J. F. (2021). Potential of Shared Taxi Services in Rural Areas-A Case Study. *Transportation Research Procedia*, 52(2020), 661–668.
- 15) Thao, V. T., Imhof, S., & von Arx, W. (2021). Integration of ridesharing with public transport in rural Switzerland: Practice and outcomes. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 10.
- 16) Lygnerud, K., & Nilsson, A. (2021). Business model components to consider for ridesharing schemes in rural areas – results from four Swedish pilot projects. *Research in Transportation Business and Management*, 40.

EVALUATING THE SUPERIORITY OF SHARED TAXIS IN RURAL AREAS FROM THE PERSPECTIVE OF NUMBER OF DRIVERS

Wenhao FENG • Keishi TANIMOTO and Takashi Fujimoto

In rural areas, the demand of public transportation is low, but it is necessary to maintain public transportation for people who cannot drive the cars, such as the elderly. Although various alternatives are available, the taxi is the most suitable form of public transportation for low demand areas. However, due to a decline in passengers and a shortage of drivers, the taxi operators' sustainability is in danger. One effective solution for driver shortage is to introduce shared taxis, but its necessity decreases as the number of passengers continues to decline. Based on these factors, taxi operators have to select the mode of transportation between shared and traditional taxis. If there is a method to evaluate shared taxis compared to traditional taxis, it will be useful in mode selection. In this study, we propose an approach for evaluating the shared taxis based on the perspective that the lower the minimum number of drivers needed for operation, the better the sustainability of taxi operators. We demonstrate the effectiveness of this approach through a case study.