

中山間地域における タクシー事業の持続可能性の分析手法

馮 文浩¹・谷本 圭志²・丹呉 允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

³非会員 国土交通省航空局交通管制部 (〒100-8918 東京都千代田区霞が関2-1-3)

E-mail: tango-m2w4@mlit.go.jp

中山間地域では、路線バスからタクシーへの転換を模索する自治体が増えている。しかし、タクシー事業は人口減少に伴う顧客の減少に加えて運転手が不足するという経営環境の変化に直面している。このため、地域の移動ニーズにタクシー事業が継続的に応えていけるかは必ずしも自明でなく、タクシーへの転換に躊躇する場合が少なくない。そこで本研究では、中山間地域の特性を踏まえてタクシーの持続可能性を分析するための数理計画モデルを混合整数計画法に基づいて構築する。その上で、実際のタクシーの運行履歴データを用いて、事業の持続可能性を実証的に考察する。

Key Words: *Taxi Service, Sustainability, Rural Areas, Mixed Integer Programming*

1. はじめに

中山間地域では、路線バスに替わる移動手段として、タクシーの役割が見直されている。タクシーは顧客の予約に基づいて柔軟に配車ができること、予約がなければ費用が発生しないなどの点で、利用者が少ない地域に適した移動手段である。また、玄関前までの輸送が可能であることから、高齢者をはじめとして、移動に際して身体的な負担を覚える人々にとっても便利な手段である。このため、路線バスからタクシーを活用した公共交通政策への転換を検討している自治体も少なくない。

しかし、タクシー事業も路線バス事業と同様に利用者が減っている。それに加え、運転手の運転手不足が深刻化している。このように、利用者の減少と運転手の不足といった経営環境の変化に直面しているタクシー事業がほとんどである。

このため、路線バスからタクシーへの転換を検討する場合、今後しばらく利益の増加が見込めるか、また、運転手の人手不足が生じることなくサービスを提供できるかといった持続可能性に懸念が残る。したがって、持続可能性が客観的に明らかにならない限り、タクシー事業への転換を躊躇する自治体やタクシー事業者が生じ、転

換が円滑に進まないことが危惧される。

そこで、本研究では、中山間地域におけるタクシー事業を対象に、利用者数が変化した場合における利益や、利用者の運送に必要な運転手の人数を導出できる数理モデルを混合整数計画法により構築する。さらに、このモデルを用いて、実際のタクシーの運行履歴データを用いて、タクシー事業者がサービスを持続的に供給するための条件を実証的に導出する。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 既往の研究

タクシーの利用実態と活用に関する研究として、福本ら¹⁾はデジタル日報データを分析し、タクシーを活用した公共交通施策の可能性を検討した。鈴木ら²⁾は、タクシーの運賃の割引率によって高齢者の外出行動や外出意識がどう変わるかについて分析した。加藤ら³⁾は、運行経費に関する簡易なシミュレーションを行い、移動の需要密度が低い状況では地域公共交通としてタクシーを活用しうることを明らかにした。

配車計画に関する研究としては、タクシーに限らない

一般的な研究はオペレーションズ・リサーチ分野において Vehicle Routing Problem として多くの蓄積がある。これまでに多くの書籍が刊行されているとともに^{4)~6)}、レビュー論文も多い。例えば、Gansterer and Hart⁷⁾は集合的車両巡回モデル、Baldacci *et al.*⁸⁾やLetchford and Gonzalez⁹⁾は車両の収容制約を考慮したモデル、Park and Kim¹⁰⁾はスクールバス巡回問題、Cordeau and Laporte¹¹⁾はダイヤルアライド問題、Desaulniers *et al.*¹²⁾は時間枠制約付き配送計画問題、Berhan *et al.*¹³⁾は確率的車両巡回モデルを扱っている。タクシーそのものに着目した研究については、佐野ら¹⁴⁾は、時間制約付き集配計画問題を定式化し、必要な車両数と最適な巡回ルートを手続き的解法である挿入法を用いて導出し、運行効率化の可能性を検討した。

土屋ら¹⁵⁾は、タクシー事業の空き時間に着目し、所与の時空間的な制約のもとでどれだけ集落を訪れて旅客運送以外の付加的なサービスを提供しうるかを明らかにするための数理最適化問題を定式化した。しかし、これらの研究は配車計画を扱っており、タクシー事業の利益やタクシー事業の運転手が減る場合での持続的な運営の可能性については明らかにしていない。

タクシーの利益については、吉田ら¹⁶⁾は乗用タクシーの定額制を導入した場合の配車データを用い、乗用タクシーの利用頻度モデルを構築した上で、タクシーの利用頻度や収入が増加する可能性を分析した。加藤ら³⁾はコミュニティバスを乗用タクシーで代替する際に、タクシー事業の運行経費に関する試算を行い、運行経費が2~7割削減できることを明らかにした。また、谷本ら¹⁷⁾は数理計画モデルを用いて、タクシーを活用した貨客混載システムを導入することによって、事業者の利益がどう変わるかを検討した。しかし、これらでは利益や費用の変化は明らかにしている。しかし、これらいずれも運転手の不足という観点での知見は得られていない。

そこで本研究では、谷本ら¹⁷⁾が開発した手法をベースとしつつ、タクシー事業の持続可能性を分析するモデルを構築する。具体的には、利益のみならず運転手の人手不足も持続可能性を脅かすことから、運転手の人数の制約を明示的に考慮しうるようモデルを拡張する。加えて、中山間地域では、顧客がいない時間帯については運転手が営業所で待機することが一般であり、そのような実態に即したモデル化を試みる。

(2) モデル化の考え方

モデルに入力する情報としては、過去の業務日誌など、どの日に何時にどこからどこまで旅客を運送したのかに関する記録データを活用する。過去のデータにはない日を想定して計算する場合、何らかの方法を用いて仮想的なデータを作成するが、この場合も上記と同様のデータを与える。これら以外にも、以下の前提をおく。

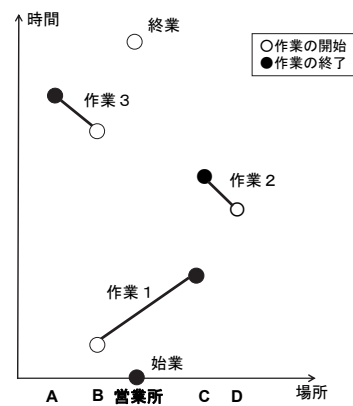


図-1 時空間平面における作業の例

- ・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。
- ・検討の対象地域にある営業所は1つである。
- ・運転手は昼に必ず営業所で休憩をとる。
- ・運転手は、所定の勤務時間以内で仕事を行う。
- ・ある乗務を終えた時点で次の乗務（以下では、「作業」と記す）が決まっていない場合、運転手は営業所にもどって待機する。
- ・運転手は顧客の予約に沿った時刻と場所に運行する。つまり、予約を断ること、時刻や目的地の変更はない。
- ・顧客は乗車する前に予約を行う。顧客からは、今すぐに配車をお願いするとの依頼があるものとする。すなわち、顧客の乗車の希望時刻より「営業所から乗車したい場所まで費やす時間」だけ前の時刻に予約が入る。

なお、最後の想定であるが、実際には必ずしもすべての予約がこのタイミングで入るわけではない。このタイミングではタクシー事業者が事前に配車を計画できないことから、利益の面でも、運転手の運用の面でも不利な状況を想定することになる。よって、この想定はこれらの双方の観点で悲観的な状況を設定するためであり、タクシーの持続可能性を安全側から評価するためである。

モデルの考え方を図-1に示す時空間平面を用いて説明する。ここでは単純化のため、地域はある道路沿いに西から東に広がっているものとする。図-1の横軸はこの広がりを表しており、左（右）側が西（東）である。縦軸はある1日における時刻であり、原点に近いほど早い時刻（朝）である。地域にはA, B, C, Dという4つの集落があり、集落BとCの間にタクシーの営業所がある。運転手は、ある時刻に営業所で勤務を開始し、終了する。これらは「始業」と付された●のノードと「終業」と付された○のノードがあることに対応している。

この図はある日において、事業者に3つの作業がある場面を表しており、○のノードで顧客が乗車し、●のノードで降車することを意味している。図では、比較的早

い時刻に B から C に向かう顧客、その後 D から C に向かう顧客、遅い時刻に B から A に向かう顧客がいることになる。なお、先述の前提により、図に示された時刻と場所通りに顧客を運送する。

この日の収入はこれらの 3 つの作業から得られる収入であり、モデルを計算せずとも求められるが、費用については運転手がどの順番で作業を実施するのかによって異なる。事業者にとって、費用は小さい方が望ましいため、仮に運転手が一人の場合、運転手の動きは、「この図にある●と○のノードをどのように結んでいけば、すべての顧客にサービスを提供しつつ、タクシーの移動距離や運転手の労働時間に伴って生じる費用が最小となるのか」という問題を解くことで求めることができる。

なお、ある作業を終えた後には別の作業を担うことになるが、その際、別のどの作業も自由に担うことができるわけではない。この図で言えば、当然ながら運転手は時間を遡ることができないため、作業 2 を終えた後に作業 1 を行うことはできない。このように、●と○のノードは自由に結ぶことはできず、時間的な制約を受ける。また、作業 1 の次に 2 を担う場合、C から D に直接向かえばよいように思えるが、必ずしもそうではない。もし、C にいる時点で作業 2 の予約が事業者に入っていなければ、C から D に向かいようがない。運転手は C から営業所にもどり、予約が入った時点で D に向かう。

以上より、時間的な制約のもとで費用が最小となるノードの結び方を求めることで、運転手の運用を模擬的に導出することができる。また、その運用のもとで生じる費用が、この日の事業に要する費用である。

運転手が複数人いる場合は、「始業」と付された●のノードと「終業」と付された○のノードに複数の運転手が存在していると考え、以上の考え方に加えて誰がどの作業を担当するのかについても計算することで、運転手の運用を導出することができる。

運転手が減ると、顧客の運送に必要な運転手が不足する可能性もある。不足する場合は、どのようにノードを結んでも、運送できない顧客が生じる。したがって、運転手が不足する場合は「予約を断ることがない」という前提を満たす解がない一方、不足しない場合には何らかの解がある。よって、解の有無に着目することで、運転手に不足が生じるか否かについて求めることができる。

以上の考え方に基づき、以下では混合整数計画法を用いてモデルを定式化する。

3. モデルの構築

任意の運転手を k ($1 \leq k \leq m$)、任意の作業を i ($0 \leq i \leq n+m+1$) で表す。作業は顧客の運送、休憩、始業と終業から

構成されており、 i ($1 \leq i \leq n$) は顧客を運送する作業、 i ($n+1 \leq i \leq n+m$) は休憩、 $i=0, n+m+1$ はそれぞれ始業と終業を表す。作業 i の次に作業 j をするか否か (する場合を $i \rightarrow j$ と表記する) をバイナリ変数 x_{ij} で表す。具体的には、次式で定義する。

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & (i \rightarrow j \text{ の場合}) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \quad (0 \leq i, j \leq n+m+1) \quad (1)$$

次式で示すように、作業 i に運転手 k を割り当てるか否か (割り当てる場合を $i:k$ と表記する) をバイナリ変数 z_{ik} で表す。

$$z_{ik} = \begin{cases} 1 & (i:k \text{ の場合}) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \quad (1 \leq i \leq n+m, 1 \leq k \leq m) \quad (2)$$

作業 i の次に作業 j を実施する場合に要する時間を c_{ij} で表し、次式のように与える。

$$c_{ij} = s_j + e_{ij} \quad (3)$$

ここで、 e_{ij} は作業 i の次に作業 j を実施する場合に要する回送時間、 s_j は作業 j に要する時間である。回送時間 e_{ij} については、作業 i を終えた地点から作業 j を開始する地点に直接移動する際の所要時間を与えればよいわけではない。例えば、そもそも、その所要時間を費やしては作業 j の開始時刻に間に合わないことがある。また、どの作業についても、予約が入った時点でそれがいつどこで発生するかを運転手を知るようになるが、作業 i を終える時刻までに作業 j の予約が入っていなければ、運転手は次の予約まで営業所で営業所しようと思うことになる。この場合、作業 i の次に作業 j をするにしても、作業 i を終えた地点から作業 j を開始する地点に直接移動しない。このように、条件によって回送時間 e_{ij} の与え方は異なる。具体的には、以下の四つのケースがある。

- 1) 作業 i が終わった直後に作業 j の開始地点に直接行っても、作業 j の開始時刻に間に合わない場合：禁止的に大きな値 (これを M で表す) を回送時間とする。
- 2) 作業 i が終わった直後に作業 j の開始地点に直接行くと、作業 j の開始時刻に間に合う場合：
 - 2-1) 作業 i を終える前に作業 j の予約が入っている場合：作業 i を終えた地点から作業 j を開始する地点に直接移動する場合の所要時間を回送時間とする。
 - 2-2) 作業 i を終えた後に作業 j の予約が入っていない場合：この場合は、作業 i を終えた地点から営業所に

一旦戻るが、さらに以下の2つに場合分けされる。

2-2-1) 営業所に戻った後に作業*j*の予約が入る場合：作業を終えた地点から営業所を経由して作業*j*の開始地点に移動する場合の所要時間を回送時間とする。

2-2-2) 営業所に戻っている途中で作業*j*の予約が入る場合：作業*i*を終えた地点から予約が入った地点を経由して作業*j*の開始地点に移動する場合の所要時間を回送時間とする。

以上を踏まえて回送時間を定式化する。作業*i*の開始ならびに終了時刻をそれぞれ $y_{i,in}$, $y_{i,out}$ 、作業*i*の終了地点から作業*j*の開始地点までの移動時間を d_{ij} 、作業*i*の終了地点から営業所までの移動時間を d_{i0} 、営業所から作業*j*の開始地点までの移動時間を d_{0j} で表す。前章に記した前提より、作業*j*の予約が入る時刻は $y_{j,in} - d_{0j}$ で表される。

まず、ケース1)に記す条件、すなわち、作業が終わった次に作業*j*の開始地点に直接行っても、作業*j*の開始時刻に間に合わない条件は、次式で表される。

$$y_{j,in} - y_{i,out} < d_{ij} \quad (4)$$

この条件のもとでの回送時間は M である。同様に、ケース2-1)に記す条件、すなわち、作業*i*を終える前に作業*j*の予約が入っている条件は、次式で表される。

$$y_{j,in} - d_{0j} \leq y_{i,out} \quad (5)$$

よって、式(4)が成立せず、かつ、式(5)が成立している場合の回送時間は d_{ij} である。ケース2-2-1)に記す条件、すなわち、営業所に戻った後に作業*j*の予約が入る条件は、次式で表される。

$$y_{i,out} + d_{i0} \leq y_{j,in} - d_{0j} \quad (6)$$

よって、式(4)が成立せず、かつ、式(6)が成立している場合の回送時間は $d_{i0} + d_{0j}$ である。ただし、任意の i, j に関して $d_{i0} + d_{0j} \geq d_{ij}$ が必ず成立することから、式(6)が成立していれば、式(4)が成立しない条件も満たされる。したがって、結果的にケース2-2-1)は、「式(6)が成立している場合の回送時間は $d_{i0} + d_{0j}$ 」と簡略化される。

ケース2-2-2)は、上記の3つの条件のいずれもが成立していない場合が条件となる。この場合の回送時間は以下のように定式化される。作業*i*を終える地点を p_i 、営業所がある地点を p_0 で表す。任意の地点 p, q 間の移動に要する最小の所要時間を $g(p, q)$ で表す。すると、地点 p_i から営業所 p_0 への最短経路上に位置する地点の集合 Q_i は次式で表される。

$$Q_i = \{q | g(p_i, q) + g(q, p_0) = g(p_i, p_0)\} \quad (7)$$

地点 p_i から営業所にもどる際、任意の地点 q を通過する時刻は、次式で表される。

$$y_{i,out} + g(p_i, q) \quad (8)$$

すると、作業*j*に関する予約が入った直後に、目的地を営業所から地点 p_j に変更する地点 q_{ij} は次式で表される。

$$q_{ij} = \operatorname{argmin}_{q \in Q_i} [g(p_i, q) | y_{i,out} + g(p_i, q) \geq y_{j,in} - d_{0j}] \quad (9)$$

以上より、ケース2-2-2)における回送時間は、次式で表される。

$$e_{ij} = g(p_i, q_{ij}) + g(q_{ij}, p_j) \quad (10)$$

以上を踏まえると、回送時間は以下で与えられる。ただし、例えば $eq.(4)$ とは「(4)式が成立していれば」という条件を表しており、上から二番目の条件部の(4)の上部にバーが付されているのは、(4)式が成立していないことを表す。

$$e_{ij} = \begin{cases} M & (eq. (4)) \\ d_{ij} & (eq. (4) \text{ and } eq. (5)) \\ d_{i0} + d_{0j} & (eq. (6)) \\ g(p_i, q_{ij}) + g(q_{ij}, p_j) & (\text{その他}) \end{cases} \quad (11)$$

単位時間当たりの燃料費を θ_1 、運転手の人件費を θ_2 で表す。運転手 k の始業時刻を t_k 、終業時刻を T_k 、休憩時間を Δr で表す。すると、事業者の費用の最小化は次式で表される。

$$\theta_1 \sum_{i=0}^{n+m+1} \sum_{j=0}^{n+m+1} c_{ij} x_{ij} + \theta_2 \sum_{k=1}^m (T_k - t_k - \Delta r) \rightarrow \min \quad (12)$$

なお、それぞれの運転手の始業、終業の時刻が決まっている場合には t_k, T_k を定数、そうでない場合は変数として与える。

すべての作業は必ず実施される条件は、以下の式(13)、(14)で表すことができる。

$$\sum_{i=0}^{n+m+1} x_{ij} = 1 \quad (1 \leq j \leq n+m) \quad (13)$$

$$\sum_{j=0}^{n+m+1} x_{ij} = 1 \quad (1 \leq i \leq n+m) \quad (14)$$

運転手が m 人いるとする。このことは、始業の後に m 件の作業に入ることができ、また、終業の前に m 件の作業を実施することができることと等価である。これらの条件は次式で表される。

$$\sum_{j=0}^{n+m+1} x_{0j} = m \quad (15)$$

$$\sum_{i=0}^{n+m+1} x_{i,n+m+1} = m \quad (16)$$

始業と終業を除いた任意の作業は一人の運転手が担当する。この条件は、次式で表される。

$$\sum_{k=1}^m z_{ik} = 1 \quad (1 \leq i \leq n) \quad (17)$$

始業と終業はどの運転手も担当するため、以下の二つの式が成立する。

$$z_{0k} = 1 \quad (1 \leq k \leq m) \quad (18)$$

$$z_{n+m+1,k} = 1 \quad (1 \leq k \leq m) \quad (19)$$

どの運転手も休憩をとることを表す制約条件は、次式で表される。

$$z_{n+k,k} = 1 \quad (1 \leq k \leq m) \quad (20)$$

作業 i と運転手 k が担当し、かつ、作業 i の次に作業 j を実施する場合、作業 j は運転手 k が担当する。この連続性は、次式で表される。

$$z_{jk} \geq z_{ik} + x_{ij} - 1 \quad (0 \leq i, j \leq n+m+1, 1 \leq k \leq m) \quad (21)$$

始業の次に運転手 k が作業 i を担当できるかの条件は次式の第一式で表される。また、終業の直前についても同様に、第二式のように定式化できる。

$$z_{ik} \leq 1 + \mu(y_{i,in} - t_k - d_{0i}) \quad (1 \leq i \leq n+m, 1 \leq k \leq m) \quad (22)$$

$$z_{ik} \leq 1 + \mu(T_k - y_{i,out} - d_{i,n+m+1}) \quad (1 \leq i \leq n+m, 1 \leq k \leq m) \quad (23)$$

ただし、 μ は右辺が 0 以下にならないように設定した定数である。 μ の具体的な設定方法については、以下の通りである。式(22)を例にとれば、 $y_{i,in}, t_k, d_{0i}$ が時間(hour)の単位で定義されている場合、 $0 \leq y_{i,in}, t_k, d_{0i} < 24$ が成り立つ。したがって $y_{i,in} - t_k - d_{0i} > -48$ が成立する。よって、 $0 < \mu \leq 1/48$ であれば右辺は 0 以下にならないため、 μ は $1/48$ と設定すればよい。

運転手 k の休憩の開始時刻を r_k 、終了時刻を R_k で表す。なお、それぞれの運転手の休憩の時刻が決まっている場合には、 r_k, R_k を定数、そうでない場合は変数として与える。変数の場合は、次式を満たさなければならない。

$$R_k \geq r_k + \Delta r \quad (1 \leq k \leq m) \quad (24)$$

休憩の前後に任意の作業を実施できるかの制約は、次式で表される。

$$x_{i,n+k} \leq 1 + \mu(r_k - y_{i,out} - d_{i,n+k}) \quad (0 \leq i \leq n+m+1, 1 \leq k \leq m) \quad (25)$$

$$x_{n+k,j} \leq 1 + \mu(y_{j,in} - R_k - d_{n+k,j}) \quad (0 \leq j \leq n+m+1, 1 \leq k \leq m) \quad (26)$$

運転手 k の休憩は自らの始業や終業の範囲内にとることを表す制約式は、次式で表される。

$$t_k \leq r_k \quad (1 \leq k \leq m) \quad (27)$$

$$R_k \leq T_k \quad (1 \leq k \leq m) \quad (28)$$

4. 実証分析

(1) 対象地域の概要

神石高原町は、広島県の東部に位置し、北は庄原市、南は福山市、東は岡山県高梁市、西は府中市と接しており、面積は 381.98km^2 の町である。令和2年7月1日現在、世帯数は $3,914$ 世帯、人口は $8,780$ 人、高齢化率は 47.35% である。過疎地域自立促進特別措置法により過疎地域として指定されている。

令和2年7月1日現在、町内の公共交通として町営バスや「ふれあいタクシー」が運行しており、町営バスには「油木～豊松線」「神石～油木線」の二路線がある。また、町内には 8 つのタクシー事業者が存在している。

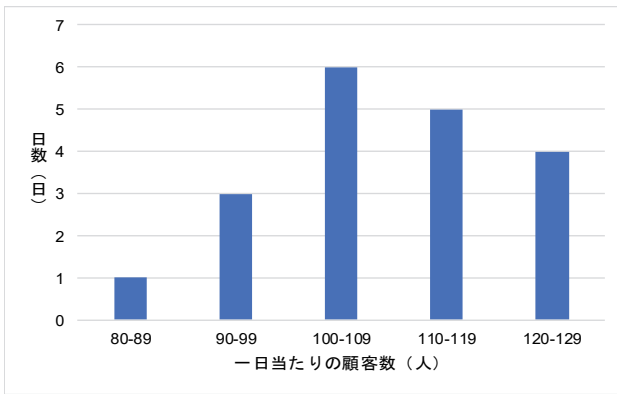


図-2 一日当たりの顧客数

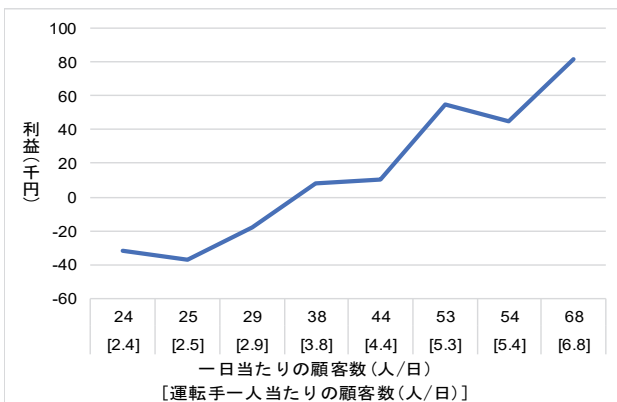


図-3 顧客数と利益の関係 (事業者 A)

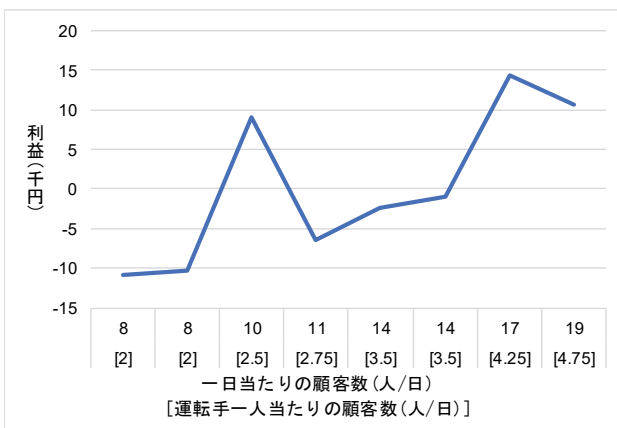


図-4 顧客数と利益の関係 (事業者 B)

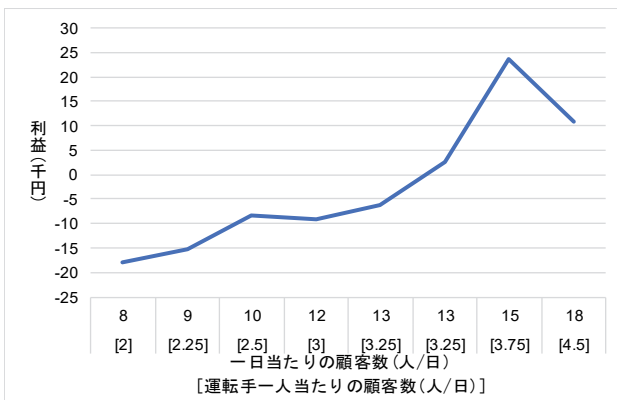


図-5 顧客数と利益の関係 (事業者 C)

(2) 分析用のデータ

以下では、8つのタクシー事業者の運行履歴データを用いる。運行履歴データは2019年9月2日～9月30日の総計2,425件であり、「日付」「乗降車時刻」「乗降車地」「利用料金」などが記されている。以下では、平日のデータのみを用いる。一日あたりの顧客数を図-2に示す。

一日あたりの顧客数が町内全体で最小、最大、平均的であった日、さらに顧客数がこれらの範囲内に位置している二日間を加え、合計五日間の履歴データを用いる。具体的には、これら五日における顧客数は顧客の少ない順に81, 94, 106, 118, 129 (人/日)である。また、今後の顧客数は現在より少なくなる見込みがあることを踏まえ、平均的な日の顧客をランダムサンプリングすることで、平均的な日に比べて顧客の人数が70%, 60%, 50%の場合の運行履歴データを仮想的に生成する。以上により、5日分の実際のデータに3日分の仮想的なデータを加えた合計8日分の履歴データを分析に用いる。分析には、運行履歴データのほかに、それぞれのタクシー事業者の運転手の人数と営業所の位置情報が必要となる。これらはいずれも、2019年9月現在の情報に基づく。

(3) 利益

運転手の勤務時間は8時間とし、11時から14時までの間に1時間の休憩を必ず取ることとする。すると、運転手の一日あたりの人件費は一定になる。中国運輸局より、運転手一人当たりの人件費を6,769 (円/日)とする。また、燃料費の単価を12 (円/km)、平均的な時速を40 (km/時間)として、時間当たりの燃料費 θ を480 (円/時間)とした。実際には、モデルで計算する燃料費と人件費の他にも一般管理費などの費用が生じる。全国ハイヤー・タクシー連合会によると、燃料費と人件費の合計とそれ以外の費用は4:1の関係にある¹⁸⁾。そこで、以下では、燃料費と人件費の合計を算出した上で、その値に1.25倍を乗じることで、全費用を算出する。

一日あたりの顧客数、運転手数がともに多い三つの事業者 (以下では、事業者A, B, Cと記す) を対象にモデルを用いて利益を導出した。なお、事業者A, B, Cの運転手の数はそれぞれ10, 4, 4人である。その結果を図-3～図-5に示す。これらの図より、運転手一人当たりの顧客数が3～4人/日以上の場合に利益が確保できることが分かる。

(4) 必要な運転手の人数

所与の顧客を運送するには何人の運転手が必要かを検討する。具体的には、 a 人の運転手のもとでモデルの解が存在する場合には、 a 人の運転手ですべての顧客を運送できるが、解が存在しなければ a 人の運転手では必ずしもすべての顧客を運送できないことから、その意味で、

a 人では運転手が不足することが分かる．そこで、タクシー事業者A,B,Cを対象に、運転手の人数を現行のそれよりも減らして与え、解の有無を調べることで、必要な運転手の人数ならびにそれらの運転手による走行距離を求めた．ただし、走行距離とは、実車距離と回送距離の合計である．計算の結果を図-6～図-8に示す．

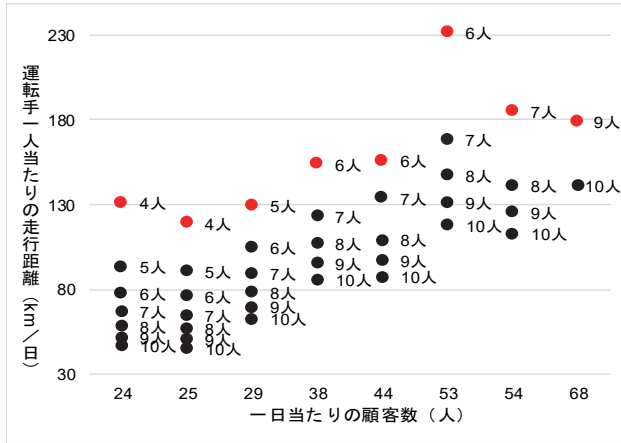


図-6 必要な運転手の人数 (事業者 A)

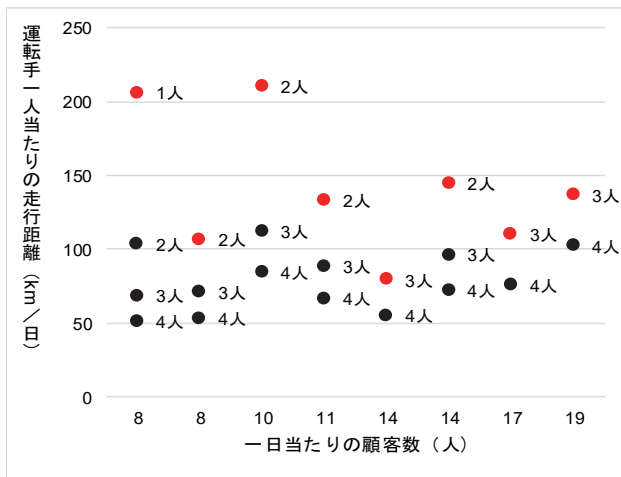


図-7 必要な運転手の人数 (事業者 B)

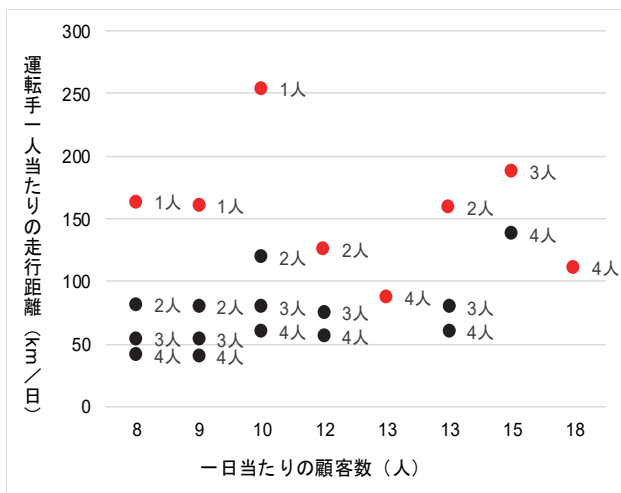


図-8 必要な運転手の人数 (事業者 C)

黒い (赤い) プロットは、所与の運転手の人数のもとですべての顧客を運送できる (できない) ことを表している．例えば、図-6の一日当たりの顧客数が53人の場合であれば、運転手が7～10人の場合はすべての顧客を運送できるが、6人の場合はそうではない．

なお、解がない場合における走行距離は、当然のことながら、モデルで算出できない．そこで、この場合には運転手の数は設定せず、すべての顧客に対して「営業所から乗車地に向かい、顧客を運送した後、降車地から営業所に戻る」という形で運送する場面を想定し、その運送に要する距離を走行距離とした．つまり、運転手が多ければこの形での運送ができ、その運送に応じた走行距離が生じるが、想定した運転手ではその運送ができないことから、この走行距離は当該の運転手では実現不可能な値となる．

これらの図より、事業者A,Bについては現行から運転手が一人でも減れば、顧客数が最も多い日にはすべての顧客を運送できない (以下では、単に「運送できない」と略す) 状況が直ちに発生することが分かる．事業者Cについては、モデルでの計算では最も多い日は現行の人数でも運送できない．これは、実際の運用では休憩などを柔軟にとっているためと考えられる．以上より、これらの事業者は、現在既にぎりぎりの状況にあることが分かる．

5. 一般的な考察

(1) 利益が生じる条件

前節では、神石高原町の各タクシー事業者に顧客数がどれほどあれば利益が生じるかを明らかにしたが、その結果をそれ以外の事業者や他の自治体に当てはめることができない．そこで以下では、利益が生じるための一般的な条件の導出を試みる．

利益は「利益=収入-費用」で求められる．ここで、収入は実車距離と関係している．そこで、神石高原町のデータを用いて一日当たりの収入と実車距離の回帰式を導出した．なお、一般に、タクシーの料金は初乗り料金と距離に応じた料金の合計であることから、顧客数を r (人/日)、実車距離を L_1 (km/日) とすると、収入は $\alpha_0 r + \alpha_1 L_1$ という関数となる．そこで、すべての事業者を対象に実際の収入との平方誤差が最小となるように α_0 と α_1 を算出したところ、 $\alpha_0 = 801$ (円)、 $\alpha_1 = 194$ (円/km) との結果が得られた．

これらのパラメータを用いて、上式によって予測される利益と利益の実績を比較したのが図-9である．決定係数は0.97であり、予測値が実際の利益を再現できていることがわかる．

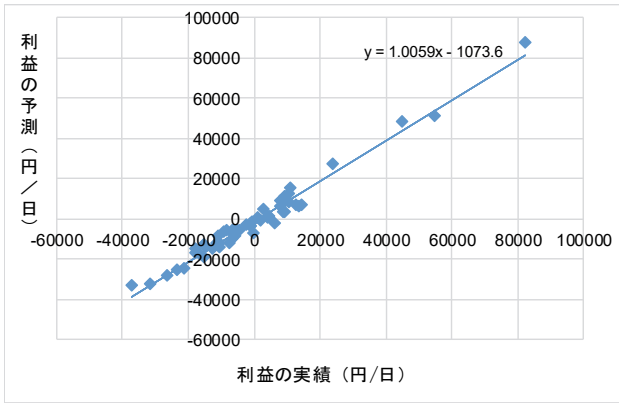


図-9 利益の実績と予測

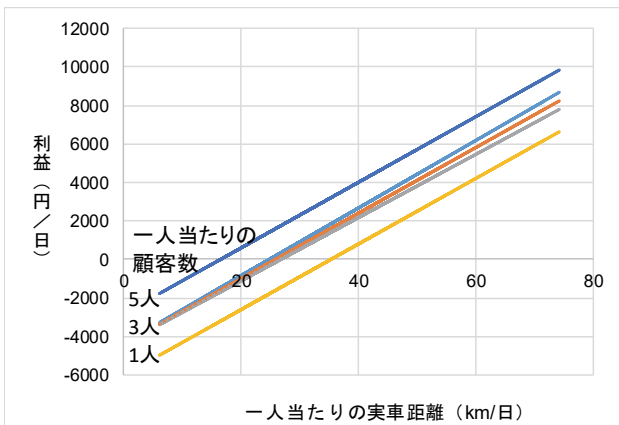


図-10 運転手一人当たりの実車距離と利益

費用は燃料費，人件費やその他の費用の合計であり，燃料費は実車と回送を合計した走行距離と関係している。先述のように，燃料費の単価は 12 (円/km) であることから，燃料費と走行距離との関係は，燃料費 = 12 (円/km) × 走行距離で表される。また，燃料費と人件費の合計とその他の費用は 4:1 の関係であることから，燃料費と人件費の合計を 1.25 倍することで全費用を求める。

すると，タクシー事業者の一日当たりの利益(P)については，次式が成立する。ただし， R は収入， C は費用， L_1 は実車距離， L_2 は回送距離， β は燃料費の単価， d は一人当たりの人件費， z は運転手の数である。

$$\begin{aligned} P &= R - C \\ &= \alpha_0 r + \alpha_1 L_1 - 1.25\beta(L_1 + L_2) - 1.25dz \quad (29) \\ &= \alpha_0 + \alpha_1 L_1 - 1.25\beta L_1 \left(1 + \frac{L_2}{L_1}\right) - 1.25dz \end{aligned}$$

すると，運転手一人当たりの利益は次式で表される。

$$\frac{P}{z} = \alpha_0 \frac{r}{z} + \alpha_1 \frac{L_1}{z} - 1.25\beta \left(\frac{L_1}{z}\right) \left(1 + \frac{L_2}{L_1}\right) - 1.25d \quad (30)$$

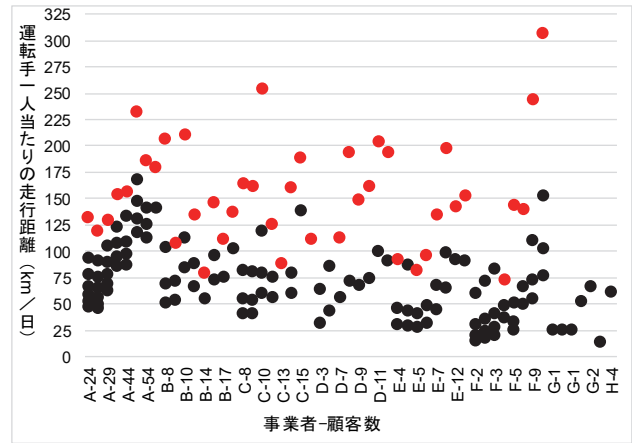


図-11 運転手の一人当たりの走行距離 (すべての事業者) (アルファベット：事業者，数値：一日当たりの顧客数)

利益の正負は一人当たりの利益の正負と同じであるため，どちらに着目しても，利益の有無に関する結果は同じである。そこで，以下では運転手一人当たりの利益に着目する。すると，式(30)に示すように，この値は(運転手)一人当たりの顧客数と実車距離，回送距離/実車距離によって決まる。そこで，式(30) (以下では，「利益線」と呼ぶ)を図-10のように可視化した。なお，今回のデータでは，これらの三つの値は以下のように分布している。

- ・ (運転手) 一人当たりの顧客数 (人/日) : 最小値 : 0.50, 最大値 : 6.80, 平均値 : 2.93
- ・ (運転手) 一人当たりの実車距離 (km/日) : 最小値 : 6.00, 最大値 : 74.17, 平均値 : 30.09
- ・ 回送距離/実車距離 : 最小値 : 0.54, 最大値 : 1.46, 平均値 : 1.03

図には三本の線が描かれているが，中央の線は一人当たりの顧客数が 3 (人/日) の場合の利益線である。ただし，実際には，この線には三本の線が重なっており，それぞれ回送距離/実車距離が 0.5, 1.0, 1.5 の場合である。このように，利益線に対する回送距離/実車距離の影響は小さい。そこで，回送距離/実車距離の値を平均的な 1.0 とした場合における，一人当たりの顧客数が 1, 5 (人/日) の場合の利益線を描いた。図から，一人当たりの顧客数が 1, 3, 5 (人/日) の場合，(運転手)一人当たりの実車距離がそれぞれ 35.2, 25.7, 16.3 (km/日) 以上で利益が生じることが分かる。

以上のように，利益という経済的な観点での持続可能性を明示的に評価することができる。

(2) 運転手が不足しない条件

運転手の直接的な生産活動は，車両を走行させることである。したがって，一日の労働時間が限られていれば，

その時間の中でしか生産活動はできないことから、一日の車両の走行距離には上限がある。よって、その上限を超過する状況が生じた場合に、運転手が不足する。以上より、運転手一人当たりの走行距離に着目すると、運転手不足が生じる／生じない条件を一般的に導出しようと考えられる。

実際、図6～図8の縦軸、すなわち、運転手一人当たりの走行距離に着目すると、すべての顧客を運送できるか否か（黒いプロットか赤いプロットか）の境界がどの事業者であってもおおむね 100 (km/日) である。そこで、これらの図で対象となっている事業者A,B,C以外の事業者を含めて同様の図を作成した。その結果を図-11に示す。横軸のアルファベットと数字はそれぞれ、事業者と一日当たり顧客数を表している。ただし、一人の運転手ですべての顧客を運送できる場合があるため、一部のケースについては、運転手不足が生じない（＝赤いプロットがない）ことに留意を要する。

この図より、運転手が多い事業者Aを除けば、運転手一人当たりの走行距離が概ね 100 (km/日) 以上の場合に運転手が不足する場合が多い。事業者Aの運転手の数は 10 人であり、必ずしも中山間地域に典型的な零細な事業者ではない。その他の事業者の運転手は 4 人以下であることから、その規模の運転手がいる事業者では、走行距離が概ね 100 (km/日) 以下であれば、運転手の不足が生じる可能性は少ないと考えられる。

事業者Aについては130 (km/日) 以下でも運転手が不足しない。これは、運転手が多いとその分柔軟な運用が可能になり、個々の運転手は多くの距離を走行できるためと考えられる。

なお、顧客が移動する時間帯がより分散している地域では、運転手の労働時間をより効率的に活用でき、より多くの距離を走行できる。神石高原町における移動の時間帯は必ずしも特殊ではないことから、その意味で、ここでの結論は他の地域にも該当すると考えられるが、分散性が高いとの特性がある地域では、100 (km/日) 以上であっても運転手が不足しないと考えられる。

以上のように、運転手不足という人的資源的な観点では、運転手の数が 4, 5 人ほどの規模の事業者については、100 (km/日) 以下の走行距離であれば事業は持続可能であると考えられる。

6. おわりに

本研究では、中山間地域におけるタクシー事業を対象に、タクシーの持続可能性を分析する数理モデルを混合整数計画法に基づいて構築した。その際、顧客がいない時間帯は運転手が営業所で待機するという中山間地域の

実態に即してモデル化した。このモデルを用い、神石高原町を対象地域とし、タクシー事業の運行履歴データを用いて顧客数に応じた利益、必要な運転手の人数を導出し、タクシー事業の持続可能性について評価を行った。

加えて、モデルの計算結果を用いて、利益が生じるための条件、運転手が不足しない条件を一般的に導出することができ、一般的な持続可能性を提示した。ただし、地域によっては様々なパラメータの値が異なる可能性がある。したがって、それらのパラメータを入手できれば、地域ごとにより正確な条件を導出することができる。この検討については、今後の課題としたい。

本研究ではタクシー事業の持続可能性を考察した。しかし、限られた運転手で顧客を運送するには、顧客の予約を調整した上で配車の時間を決定したり、車両の乗り合い制度を導入するなどの様々な改善策が考えられる。これらを組み込んだ配車のアルゴリズムの研究は、リアルタイムの意思決定モデルについては盛んに行われている一方、ここで着目したように、そもそもそのような方策を導入するかというマネジメントレベルの意思決定に関する研究はほとんどない。すなわち、どのような条件のもとでこれらの策が有効なのかに関する蓄積はない。今後は、ここで構築したモデルを拡張し、これらの要請に応えるための知見を獲得することを目指したい。

謝辞： 本研究はJSPS科研費 JP20H02276の助成を受けた。データの整理については宮地岳志（バイタルリード）、龍河駿介氏（当時、鳥取大学工学部）に多くの助力を得た。付して謝辞と致します。

参考文献

- 1) 福本雅之・松尾幸二郎・松本幸正・山下隆道：デジタル日報データによるタクシー利用の実態把握と公共交通施策への活用に関する研究，交通工学論文集，第3巻2号，pp. B_61-B_66, 2017.
- 2) 鈴木雄，日野智，前田悠抄：タクシー運賃の割引率が高齢者の外出行動へ与える影響に関する研究，都市計画論文集，第52巻3号，pp. 795-801, 2017.
- 3) 加藤秀樹，福本雅之：乗用タクシーによるコミュニティバス代替可能性の検討，交通工学論文集，第5巻2号，pp. A_27-A_32, 2019.
- 4) Toth, P., Vigo, D.: Vehicle routing: problems, methods, and applications, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2015.
- 5) Labadie, N., Prins, C., and Prodhon, C.: Metaheuristics for vehicle routing problems, Wiley-ISTE, 2016.
- 6) Golden, B. L., Raghavan, S., and Wasil, E. A.: The vehicle routing problem: latest advances and new challenges, Springer, 2008.
- 7) Gansterer, M., Hartl, R. F.: Collaborative vehicle routing: A survey, European Journal of Operational Research 268, pp. 1-12, 2018.

- 8) Baldacci, R., Toth, P., and Vigo, D.: Exact algorithms for routing problems under vehicle capacity constraints, *Annals of Operations Research* 175 (1), pp. 213-245, 2010.
- 9) Letchford, A. N., and Salazar Gonzalez, J. J.: Projection results for vehicle routing, *Mathematical Programming Series B* 105, pp. 251-274, 2006.
- 10) Park, J. and Kim, B.I.: The school bus routing problem: A review, *European Journal of Operations Research* 202, pp. 311-319, 2010.
- 11) Cordeau, J.F. and Laporte, G: The dial-a-ride problem (DARP): Variants, modeling issues and algorithms. *4OR, A Quarterly Journal of Operations Research* 1, pp. 89-101, 2003.
- 12) Desaulniers, G., Lessard, F., and Hadjar, A.: Tabu search, partial elementarity, and generalized k-path inequalities for the vehicle routing problem with time windows, *Transportation Science* 42 (3), pp. 387-404, 2008.
- 13) Berhan, E., Beshah, B., Kitaw, D., and Abraham, A.: Stochastic vehicle routing problem: A literature survey. *Journal of Information & Knowledge Management* 13 (3), 1450022, 2014.
- 14) 佐野可寸志, 王凱, 鳩山紀一郎, 高橋貴生, 渡利友紀: GPS データを用いたタクシー運行実態の分析と効率化の可能性, *交通工学論文集*, 第 6 巻 2 号, pp. A_280-A_285, 2020.
- 15) 土屋哲, 谷本圭志: 過疎地域のタクシー事業者による付随的サービスの供給可能性に関する概略分析, *交通工学論文集*, 第 6 巻 2 号, pp. A_280-A286, 2017.
- 16) 吉田樹: 地方小都市における乗用タクシーの定額制サービス導入可能性の検討 -福島県南相馬市のケーススタディー-, *交通工学論文集*, 第 6 巻 2 号, pp. A_183-A_189, 2020.
- 17) 谷本圭志, 小澤陽: タクシーを活用した貨客混載システムの導入可能性の評価に関する基礎的手法の構築, *都市計画論文集*, 第 54 巻 3 号, pp. 665-671, 2019.
- 18) 例えば, 一般社団法人 全国ハイヤー・タクシー連合会: TAXI TODAY in Japan 2020, p.8, 2020.
http://www.taxi-japan.or.jp/pdf/Taxi_Today_2020.pdf

(2020.10.2)

SUSTAINABILITY ANALYSIS OF TAXI BUSINESS IN RURAL AREAS

Wenhao FENG, Keishi TANIMOTO and Makoto TANGO

The sustainability of the taxi services has been threaten by the decrease of users and taxi drivers. Therefore, the municipalities may hesitate to change the public transportation to taxi services even if taxi service is better for the time being. In this study, we construct a mathematical planning model to evaluate the profits and the number of drivers required for the operation using the mixed integer programming with the operational characteristics in rural areas considered. Then, this model is applied to the municipality in Japan using actual historical data of the operation. As a result, the condition that the company makes a profit and the shortage of drivers is not occurred.