

中山間地域における 乗合タクシーの供給能力に関する考察

藤本 隆志¹・谷本 圭志²・馮 文浩³

¹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

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 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

中山間地域では公共交通としてタクシーを活用する場面が見られる。しかし、多くのタクシー事業者は運転手の不足に直面していることから、サービスの持続的な供給に懸念があるため、少ない運転手でも顧客を運送できる運行形式が望まれる。その一つの形式として乗合タクシーが考えられるものの、乗り合わない場合と比べて、顧客の運送に必要な運転手の数が変わらない場合もありうる。そこで本研究では、サービスの供給に必要な運転手の数という観点で、乗合タクシーが有効となる条件を明らかにする。その際、タクシーの運行を再現するモデルを混合整数計画法により構築し、必要な運転手の数を導出するとともに、上記の条件を実際の事業者を対象として実証的に検討する。

Key Words: Shared Taxi Service, Rural Areas, Mixed Integer Programming

1. はじめに

人々が日常的に利用する移動手段の一つとして公共交通サービスがある。公共交通サービスの代表的な手段として路線バスがあるが、中山間地域のように人口減少が進んだ地域では公共交通を利用する人数が少なくなっていることから、公共交通としてタクシーを活用するケースが多く見られるようになってきている。今後も人口の減少が続くため、このようなケースの増加が予想される。

その一方で、多くのタクシー事業者は運転手の不足に直面している。具体的には、タクシーの運転手の人数が減るとともに、高齢化も進んでいるため、今後も慢性的に不足すると考えられる。このため、運転手が少なくなってもサービスが維持できる運行形式を採用し、持続可能性を維持することが求められる。その有力な形式として乗合タクシーがある。

しかし、乗合タクシーを導入するには、法的な要件を満たすことや乗り合いを成立させるための技術などが必要である。加えて、目的地まで迂回が生じうるなど、乗客に不便をもたらすこともある。このように、乗合タクシーには短所もある。このため、乗り合っても乗り合わなくても必要な運転手の数が変わらない場合には、一般のタクシーの形式で運行することが適切である。

そこで本研究では、中山間地域における乗合タクシー

を対象として、タクシーの運行を再現するモデルを混合整数計画法により定式化し、必要な運転手の数を導出する方法論を構築する。その際、乗り合いできる人数を任意に与えるようにモデル化することで、一般のタクシーの運行もこのモデルで再現できるようにする。その上で、乗り合う場合と乗り合わない場合の形式のもとで必要となる運転手がどれほど異なるかを比較するとともに、どのような条件のもとで乗合の形式が有効かについて、実際の事業者を対象として実証的に検討する。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 既往の研究

乗合タクシーに関する研究には、いくつかの観点がある。その一つとして、事業に関する実態や意識に着目した研究がある。例えば、猪井ら¹⁾は、事業者を対象として調査を実施し、事業者の乗合事業への参入意向を分析し、事業の多角化・効率化を図っている事業者は積極的な参入態度を持つ傾向にある一方、中規模の事業者は参入意向が低い傾向にあることを明らかにしている。また、市川²⁾は、全国都市調査を通じて生活交通手段の導入・運行・利用実態に着目し、デマンド型の乗合タクシーに

については自治体の運行負担が大きく、利便性と財政負担のバランスに課題があることを明らかにした。

二つ目については、運送計画に関する研究である。この分野はオペレーションズ・リサーチの分野における Vehicle Routing Problem に属しており、これまでに多くの書籍^{3)~9)}が刊行されていることに加え、Gansterer and Hartl⁶⁾による集合的車両巡回モデル、Baldacci *et al.*⁷⁾や Letchford and Gonzalez⁸⁾による車両の収容制約を考慮したモデル、Park and Kim⁹⁾によるスクールバス巡回問題、Cordeau and Laporte¹⁰⁾によるダイヤルアライド問題など、多様なレビュー論文が蓄積されている。わが国においては、中島ら¹¹⁾は、都市部を対象として、すべての車両の位置と経路を管理し、乗合でデマンドに即時に対応するシステムを開発した。西ら¹²⁾は、車両のリバイシング最適化問題に対し、エリアを階層的に分割し、粗い粒度のエリアから細かな粒度のエリアへと階層的に車両の配置を最適化する手法を提案している。落合ら¹³⁾は、名古屋市のタクシー配車データに基づき、顧客が独占的に車両を占有する現行のタクシーサービスを乗り合い可能とした場合に着目し、その効率性を評価している。

三つ目については、事業性に関する研究である。竹内ら¹⁴⁾は、「コミュニティバス」「タクシーの空車時間利用」「乗合型の需要応答型交通」といった交通手段に要する運行コストを比較し、需要密度が低い地域では乗合型の需要応答型交通が有効であることを明らかにした。

以上のように、いくつかの観点による研究がある。一方、人口が少ない地域では、事業者の運転手が不足することが懸念されるため、その観点で乗合タクシー事業の有効性を検討することも必要である。この課題に対して、一般のタクシーであれば、中山間地域を対象として一日に一人の運転手がどれほどのサービスを供給可能かについて走行距離に着目して導出した馮ら¹⁵⁾、同様の観点に基づきつつ、顧客が利用する時刻を調整する場合に走行距離がどれほど向上するのかを検討した馮ら¹⁶⁾がある。しかし、乗合タクシーについては、同様の研究が見当たらない。

(2) 必要な運転手の人数を導出するアプローチ

馮ら¹⁵⁾が提案した方法論を用いて、顧客の運送に必要な運転手の人数を求める。具体的には、以下の考え方に基づく。

- ・ある一日を対象とし、その日における特定の事業者の顧客を所与として、その事業者の運転手が a 人の場合にすべての顧客を運送できるか、また、そのためにどれだけの距離を走行するのかを導出するためのモデルを構築する。その際、走行距離の最小化を目的関数とする。
- ・その上で、運転手の人数である a を替え、すべての顧

客を運送するために最低でも何人の運転手が必要か、ならびに、その人数のもとでの走行距離を導出する。なお、必要な運転手の人数よりも小さな人数を与えて計算した場合は、実行可能な解が存在しない。

- ・以上を、すべての検討対象日について計算する。

上記のように、モデルを用いて、すべての顧客を運送するために最低何人の運転手が必要かを求めるが、そうであれば、目的関数は走行距離の最小化ではなく、運転手の人数の最小化とすることが適切と考えられそうである。しかし、本研究ではどのような条件で乗合が有効となるのかということも検討する。その条件として、以下で述べるように走行距離の結果を必要とする。

運転手の人数を最小化するモデルでは、例えば、最低でも 2 人の運転手が必要であるという解が得られたとしても、この 2 人による運行の仕方は一意に決まらないため、走行距離を一意に求めることもできない。一方、現実的には運転手の効率的な運用、顧客に対する利便性を考えて運行することを考えると、この状況は走行距離の最小化として定式化することが一般であり、かつ、走行距離も一意に決まる。このため、本研究では運転手の人数を最小化するモデルではなく、走行距離を最小化するモデルを用いて、感度分析的なアプローチで必要となる運転手の人数を求める。

(3) 対象とする運行形式とそれらの比較手法

上記により、すべての検討対象日について必要な運転手の人数ならびに走行距離を求める。その際、乗合タクシーとそうでない運行形式を対象とするが、以下では乗り合うか否かという二択ではなく、乗合タクシーには二つの機能があることに着目し、三つの形式を対象とする。すなわち、乗合タクシーには、複数の顧客が乗り合うという機能と、乗り合いを成立するために顧客の利用時刻を調整するという機能がある。そこで、具体的には以下の 3 種類を取り上げることとする。

- 1) 顧客を個別に運送する。顧客が予約した時刻どおりにタクシーを配車する形式（以下では、「リアルタイム配車」と呼ぶ）
- 2) 顧客を個別に運送する。顧客の利用時刻を調整した上で、一定の時間内にタクシーを配車する形式（「調整」と略す）
- 3) 顧客の利用時刻を調整した上で、一定の時間内にタクシーを配車しつつ、一定の収容人数のもとで顧客の乗合を認める形式（「乗合」と略す）

「リアルタイム配車」が一般のタクシー、「乗合」が乗合タクシーの形式である。ただし、一般のタクシーの運用においては、顧客に利用時刻の調整を依頼する場合がある。その意味では、一般のタクシーは「調整」の形式に近いとも言える。これらの 3 つの形式を想定するこ

とで、どのような条件のもとでの機能が有効なのかを明らかにすることができる。

以上より、すべての検討対象日を対象として、3つの運行形式のもとで顧客の運送に最低限必要な運転手の人数、そのもとでの走行距離、顧客の人数をそれぞれ求めた上で、どのような条件においてどの形式のもとでの運転手の人数が少なく済むのかを検討する。

(4) モデル化の考え方

以下では「リアルタイム配車」「調整」「乗合」という3つの運行形式を比較するが、「リアルタイム配車」と「調整」は「乗合」の特殊なケースである。すなわち、先述のように、「乗合」は顧客の利用時刻を調整した上で、一定の時間内にタクシーを配車しつつ、一定の収容人数のもとで顧客の乗合を認める形式であるが、「調整」は顧客の乗合を認めない場合、「リアルタイム配車」は顧客の利用時刻の調整も乗合も認めない場合である。

そこで以下では、「乗合」に関するモデルを構築する。「リアルタイム配車」「調整」の運行形式をこのモデルのもとでどう表現するかについては後述する。ここでは、モデル化の前提について整理する。

- ・顧客は運送を希望する時刻を事業者伝えて予約をする。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。
- ・顧客は希望の時刻通りに運送してもらえないわけではない。希望に沿わなくても、乗車、降車の希望時刻から所定の時間以内であれば、顧客は予約を取り消すことはない。
- ・予約が入った顧客は全員運送する。
- ・車両には複数の顧客が乗り合えるが、収容人数以下でなければならない。
- ・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（始業）、営業所にもどって仕事を終える（終業）。
- ・事業者が有する営業所は一つである。
- ・運転手は昼に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。

3. モデルの構築

運転手は m 人であり、任意の運転手を $k(1 \leq k \leq m)$ で表す。任意の一日に運送する顧客は n 人であるとする。このもとで、顧客を車両に乗車もしくは降車させる作業を $i(1 \leq i \leq 2n)$ で表し、 $1 \leq i \leq n$ は乗車、 $n+1 \leq i \leq 2n$ は降車であるとする。なお、 i と $n+i$ はそれぞれ、同一の顧客の乗車と降車を表しており、その意味で、 i は任意の顧客を表

す変数でもある。このため、以下では i を顧客として言及する場合もある。また、 $i = 2n+1$ は運転手の昼休憩、 $i = 2n+2$ は始業、 $i = 2n+3$ は終業を表す。以後、任意の $i(1 \leq i \leq 2n+3)$ を一括して「作業」と呼ぶ。作業 i を終えた直後に作業 j に運転手 k を割り当てるか否かを表す変数を x_{ijk} で表し、以下のように定義する。ただし、 $k: i \rightarrow j$ は作業 i を終えた直後に作業 j に運転手 k を割り当てることを意味する。

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & (k: i \rightarrow j \text{ の場合}) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases} \quad (1)$$

$$(1 \leq i, j \leq 2n+3, 1 \leq k \leq m)$$

任意の作業 i から j への移動に要する距離を l_{ij} で表す。事業者は走行距離を最小化する。このもとで、事業者の目的関数は次式で表される。

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{2n+3} \sum_{j=1}^{2n+3} l_{ij} x_{ijk} \rightarrow \min \quad (2)$$

運転手は一日の初めに始業を行い、終わりに終業を行う。この条件は以下のように定式化できる。

$$\sum_{j=1}^n x_{2n+2,j,k} + x_{2n+2,2n+1,k} = 1 \quad (1 \leq k \leq m) \quad (3)$$

$$\sum_{i=n+1}^{2n+1} x_{i,2n+3,k} = 1 \quad (1 \leq k \leq m) \quad (4)$$

タクシー事業者は、すべての顧客を運送しなければならない。このことは、すべての乗降の作業を実施しなければならないことと等価である。この条件は以下のように定式化できる。

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=1, j \neq i}^{2n+1} x_{ijk} + \sum_{k=1}^m x_{i,2n+3,k} = 1 \quad (1 \leq i \leq 2n) \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1, i \neq j}^{2n+2} x_{ijk} = 1 \quad (1 \leq j \leq 2n) \quad (6)$$

作業 i から j への移動に要する時間を c_{ij} 、作業 i の実施時刻を t_i とする。作業に要する時間は 0 であるとする。すると、作業 j における時刻は、直前に行う作業 i における時刻に作業 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。この条件は、以下のように定式化できる。ただし、 M は禁止的に大きな値である。

$$t_j \geq t_i + c_{ij} - M \left(1 - \sum_{k=1}^m x_{ijk} \right) \quad (1 \leq i, j \leq 2n) \quad (7)$$

始業の時刻を f_k とすると、その直後に行う作業 j の時刻は、始業の時刻 f_k に始業から作業 j への移動時間を加えた時刻以降でなければならない。この条件は、以下のように定式化できる。

$$t_j \geq f_k + c_{2n+2,j} - M(1 - x_{2n+2,j,k}) \quad (1 \leq j \leq 2n, 1 \leq k \leq m) \quad (8)$$

終業の時刻を F_k とすると、 F_k は、その直前に行う作業 i の時刻 t_i に作業 i から終業への移動時間を加えた時刻以降でなければならない。この条件は、以下のように定式化できる。

$$F_k \geq t_i + c_{i,2n+3} - M(1 - x_{i,2n+3,k}) \quad (1 \leq i \leq 2n, 1 \leq k \leq m) \quad (9)$$

運転手 k に関する休憩の開始時刻を r_k で表し、すべての運転手は R 時間以上の休憩をとらなければならないとする。すると、休憩の開始時刻と終了時刻に関して、式 (8), (9) と同様の制約条件を以下のように定式化できる。

$$r_k \geq t_i + c_{i,2n+1} - M(1 - x_{i,2n+1,k}) \quad (1 \leq i \leq 2n, 1 \leq k \leq m) \quad (10)$$

$$t_j \geq r_k + R + c_{2n+1,j} - M(1 - x_{2n+1,j,k}) \quad (1 \leq j \leq 2n, 1 \leq k \leq m) \quad (11)$$

休憩の開始時刻は、始業の後でなければならない。また、休憩の終了時刻は終業の前でなければならない。これら条件は、以下のように定式化できる。

$$r_k \geq f_k \quad (1 \leq k \leq m) \quad (12)$$

$$F_k \geq r_k + R \quad (1 \leq k \leq m) \quad (13)$$

顧客 i の乗車と降車の時刻に関して、降車時刻は乗車時刻より後となる。このことは次式で表される。

$$t_{n+i} - t_i \geq 0 \quad (1 \leq i \leq n) \quad (14)$$

顧客が希望する乗降時刻と、実際に乗降できる時刻との差は、一定の許容範囲に収めなければならない。ここで、顧客が希望する時刻を d_i 、許容範囲を ε で表すと、この条件は以下のように定式化できる。

$$-\varepsilon \leq d_i - t_i \leq \varepsilon \quad (1 \leq i \leq 2n) \quad (15)$$

すべての運転手は昼休憩をとる必要がある。この制約は次式で表される。

$$\sum_{j=1}^n x_{2n+1,j,k} + x_{2n+1,2n+3,k} = 1 \quad (1 \leq k \leq m) \quad (16)$$

$$\sum_{i=n+1}^{2n} x_{i,2n+1,k} + x_{2n+2,2n+1,k} = 1 \quad (1 \leq k \leq m) \quad (17)$$

任意の作業 i を開始した運転手は、作業 i を終える運転手であるとの条件は、次式で表される。

$$\sum_{j=1}^{2n+3} x_{ijk} = \sum_{j=1}^{2n+3} x_{jik} \quad (1 \leq i \leq 2n, 1 \leq k \leq m) \quad (18)$$

顧客 i を運送した（しない）運転手は、作業 i と $n+i$ を担う（担わない）ことを条件づけるための式は、次式で表される。

$$\sum_{j=1}^{2n+3} x_{ijk} = \sum_{j=1}^{2n+3} x_{n+i,j,k} \quad (1 \leq i \leq n, 1 \leq k \leq m) \quad (19)$$

すべての運転手は、勤務時間 T 以内で作業を行うものとする。この条件は、以下のように定式化できる。

$$F_k - f_k \leq T \quad (1 \leq k \leq m) \quad (20)$$

休憩をとることができる時刻は T_1 から T_2 までとする。これは、次式で表される。

$$r_k \geq T_1 \quad (1 \leq k \leq m) \quad (21)$$

$$r_k + R \leq T_2 \quad (1 \leq k \leq m) \quad (22)$$

顧客の移動にかかる所要時間は、顧客が希望する所要時間の λ 倍以内でなければならない。この条件は、以下のように定式化できる。

$$t_{n+i} - t_i \leq \lambda(d_{n+i} - d_i) \quad (1 \leq i \leq n) \quad (23)$$

休憩、始業、終業においては車両に顧客は乗っていない。このことを次式で表す。なお、 u_i は作業 i において車両に乗車している顧客の数になぞらえた変数であり、車両の収容人数を超過して顧客を乗せることができない

ことを表すために導入される変数である.

$$u_{2n+1,k} = 0 \quad (1 \leq k \leq m) \quad (24)$$

$$u_{2n+2,k} = 0 \quad (1 \leq k \leq m) \quad (25)$$

$$u_{2n+3,k} = 0 \quad (1 \leq k \leq m) \quad (26)$$

車両の収容人数を超過して顧客を乗せることができないことは、以下のように定式化できる. ただし, 車両の収容人数を Q で表す.

$$0 \leq u_i \leq Q \quad (1 \leq i \leq 2n) \quad (27)$$

顧客を乗車させる作業では車両の乗客数が一人増え, 降車させる作業では一人減る. また, 休憩や始業, 終業では乗客数に変化はない. これらは, 以下のように定式化できる.

$$u_j \geq 1 + u_i - M \left(1 - \sum_{k=1}^m x_{ijk} \right) \quad (1 \leq i \leq 2n+3, 1 \leq j \leq n) \quad (28)$$

$$u_j \geq -1 + u_i - M \left(1 - \sum_{k=1}^m x_{ijk} \right) \quad (1 \leq i \leq 2n+3, n+1 \leq j \leq 2n) \quad (29)$$

$$u_j \geq u_i - M \left(1 - \sum_{k=1}^m x_{ijk} \right) \quad (1 \leq i \leq 2n+3, 2n+1 \leq j \leq 2n+3) \quad (30)$$

上記は「乗合」の運行形式を想定したモデルであるが, 「リアルタイム配車」の形式では, 顧客が希望する時刻通りに車両を運行しつつ, 乗り合いを認めない. そこで, 式(15)における ε を $\varepsilon=0$ (分), 式(27)における Q を $Q=1$ (人) として計算すれば, この形式のもとでの解が得られる. 同様に, 「調整」の形式では, 顧客の利用時刻を調整するが, 乗り合いを認めない. このため, $Q=1$ (人) として計算すればよい.

4. 実証分析

(1) 対象地域の概要

広島県の神石高原町を対象とする. 神石高原町は広島県の東部に位置し, 岡山県に接する町である. 2021年1月1日現在, 世帯数は3,904世帯, 人口は8,691人, 高齢化率は約48%であり, 面積は約380km²である.

(2) 分析用のデータ

神石高原町で営業しているあ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30日までの1ヶ月間における322件である. 運行履歴としては, 乗降車時刻や乗車地などが含まれている. なお, この期間の2日はデータが欠損しているため, 28日分を対象とする. 事業者の運転手は現行と同じ4人の運転手がいるものとする.

(3) 分析の準備

作業間の移動に要する距離は, 道路ネットワークに基づいた最短距離(道路距離)で計測した. また, 履歴データの中で最も利用が多いトリップが上豊松地区から神石高原町立病院であるため, 上豊松地区の中心である上豊松コミュニティセンターから神石高原町立病院までの距離ならびに所要時間をGoogle Mapで計測した. その結果を踏まえて, 距離を時間に変換する場合には, 平均的な時速を40(km/時間)と与えた. 運転手の勤務時間は9時間とし, 11時から14時までに必ず1時間の休憩をとることとする ($T=9, T_1=11, T_2=14, R=1$). 顧客の移動にかかる所要時間は, 顧客の希望する所要時間の1.75倍以内でなければならないものとする ($\lambda=1.75$). また, 「調整」「乗合」のもとでの計算には, 式(15)における ε は $\varepsilon=30$ (分), 「乗合」のもとでの計算には, $Q=8$ (人) とする. 以上の設定のもと, gurobi 9.12を用いて計算する.

(4) 必要な運転手の人数

すべての検討対象日に関する計算の結果を図-1に示す. なお, 運転手の人数は, 事業者における1日当たりの走行距離が大きいほど多くの人数を要することが一般であり, したがって「調整」や「乗合」という工夫を施すことで運転手の人数は小さく抑えられると期待できるため, 図の横軸は暫定的に走行距離とした. また, 図には二種類のプロットを記しており, 一つ(青い印)は「リアルタイム配車」から「調整」に運行形式を変更した場合, もう一つ(橙の印)は「調整」から「乗合」に変更した場合に削減される運転手の人数を表している. ただし, 前者のプロットにおける走行距離は, 運行形式の変更前, すなわち, 「リアルタイム配車」の場合での走行距離, 後者のプロットにおける走行距離についても同様に「調整」における走行距離である.

この図より, 「リアルタイム配車」から「調整」, 「調整」から「乗合」に運行形式を変更した場合には, 運転手の人数は減ることがあっても増えることはないことがわかる. 「リアルタイム配車」に比べて「調整」は, 顧客の利用時刻を調整する機能が付加されており, また, 「調整」に比べて「乗合」は, さらに複数の顧客が乗り



図-1 運転手の人数の変化

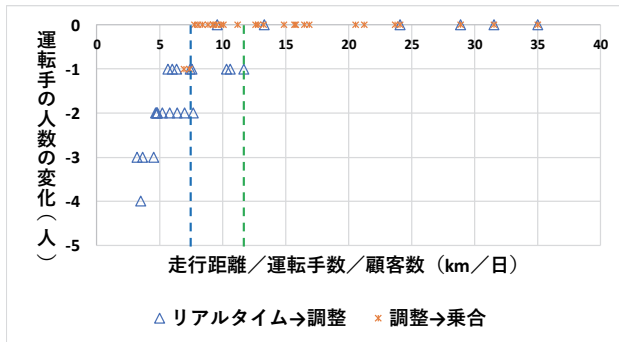


図-2 合成指標のもとでの運転手の人数の変化

合うという機能も付加されている。したがって、必要となる運転手は「乗合」で最小、「リアルタイム配車」で最大になることは、計算をせずとも自ずと導出できる性質であり、この自明な性質が確認できるという意味で妥当な結果が得られている。

しかし、横軸である事業者の一日当たりの走行距離に着目すると、この値が大きいほど運転手の人数が減る傾向は大まかにうかがえるものの、走行距離が人数の削減数を決定づける有力な要因では必ずしもない。つまり、ある走行距離において運行形式の変更によって運転手の削減が見られる一方で、それよりも大きな走行距離で削減が見られない場合も多くある。

そこで以下では、走行距離に替わるどのような指標が削減の傾向をより適切に説明できるかを検討した上で、その指標がどの範囲にある場合に「リアルタイム配車」「調整」「乗合」が必要となる運転手の人数の観点で有効となるのかについて検討する。

(5) 指標の作成

「調整」や「乗合」という工夫は、運転手の人数を少なくするための工夫である。換言すると、工夫がなければ多くの運転手を要する場面においてこそ、削減が期待できる。そこで、まずは多くの運転手を要する場面を特定する。

その一つとしては、顧客の多さが考えられる。すなわち、顧客が多ければ、多くの運転手が必要であるという

自明の関係が想定できる。ただし、顧客が多い場合であっても、それらの時空間的な分布が供給者にとって望ましい場合かどうかで、必要となる運転手の人数は異なりうる。例えば、顧客を降ろした時刻と場所で別の顧客を乗車できるといったような供給側にとって都合のよい分布のもとでは、顧客が多くても工夫なしに少ない運転手で対応可能であろう。そこで、二つ目としては顧客による利用の時空間的な分布が考えられる。これは直ちに指標化できないものの、運転手 1 人当たりの走行距離で測定することが考えられる。これは、顧客が供給側に都合よく分布していれば、個々の運転手は一日に多くの走行距離を運行することができるが、そうでなければ走行距離は限定的にならざるを得ないためである。

以上より、「顧客の多さ」と「運転手 1 人当たりの走行距離」の合成が適当な指標と考えられる。ここで、運転手 1 人当たりの走行距離が大きいほど運転手の人数は少なくて済む一方、顧客が多いほど運転手の人数が多くなることから、合成指標は（走行距離÷必要となる運転手数）×（1÷顧客数）として定義できる。この定義のもとでは、指標の値が大きいほど運転手の人数は少ないという関係が想定される。なお、図-1の横軸に用いた走行距離も運転手の多さに影響を及ぼすが、上記の合成指標はその定義から分かるように、走行距離にも影響を受ける。このため、合成指標は走行距離も反映している。

(6) 運行形式が有効となる範囲

図-1の横軸を走行距離から上述の合成指標に替えた結果を図-2に示す。これらの図を比較すると、図-2が運転手の削減の傾向をうまく説明できていることが確認できる。図-2より、どのような条件で「調整」や「乗合」という工夫が功を奏すかが具体的にみて取れる。すなわち、指標が緑色の破線で示した約 12 (km/日) 未満であれば、「リアルタイム配車」から「調整」に運行形式を変更することで必要となる運転手が削減されている。同様に、指標が、青色の破線で示した約 7.5 (km/日) 以下になると、「調整」から「乗合」に運行形式を変更することで必要となる運転手が削減されている。ただし、削減された事例は、対象日である 28 日分のうちの 2 日分のみであることに留意を要する。

以上を踏まえると、今回分析の対象とした事業者においては、合成指標が約 12 (km/日) 以下の範囲においては、顧客の利用時刻を調整する機能が有効に働くと考えられる。同様に、合成指標が約 7.5 (km/日) 以下の範囲では、上記の機能だけでなく、複数の顧客が乗り合う機能も有効に働くと考えられる。したがって、合成指標が約 12 (km/日) 以上の範囲においては、「リアルタイム配車」、指標が約 7.5 (km/日) 以上でかつ 12 (km/日) 未満の範囲では「調整」が有効な運行形式

であり、指標が約 7.5 (km/日) 未満の範囲では「乗合」の運行形式が有効になり得ると考えられる。このように、乗り合いタクシーはどのような場合においても有効ということではなく、リアルタイム配車で足りる場合や、時刻の調整のみを行えば十分である場合もあることが具体的に理解できる。

5. おわりに

本研究では、中山間地域における乗合タクシーを対象として、タクシーの運行を再現するモデルを混合整数計画法により定式化した。その上で、神石高原町で営業しているあるタクシー事業者の運行履歴データを用いて、顧客の運送に最低限必要となる運転手数をモデルにより導出した。その際、「リアルタイム配車」、「調整」、「乗合」の3つの運行形式に着目し、必要となる運転手の人数を導出した。

また、「リアルタイム配車」から「調整」、「調整」から「乗合」に形式を変更する場面を想定し、運転手の人数の削減がなされることを確認するとともに、どのような条件のもとでそれぞれの形式が有効になるのかを実証的に明らかにした。ただし、「調整」から「乗合」に形式を変更した場合では、運転手の人数が削減された事例は2日のみであり、実証の信頼性は不十分である。このため、今後は分析の対象とする日を増やすなどして、この事例の観測数を増やし、各々の形式が有効となる条件を正確に特定したい。

上述のように、「リアルタイム配車」から「調整」、「調整」から「乗合」というように、運行形式の変更については機能が向上する場面を想定して検討した。しかし、人口減少が進む地域ではタクシーの顧客の数も少なくなることから、「乗合」から「調整」、「調整」から「リアルタイム配車」というように、機能を縮小する場面が多く想定される。この場面においても同様の検討を行い、それぞれの形式が有効となる条件を特定することも重要な課題である。

今回は、一つの事業者を対象としたが、他の事業者や別の自治体を対象とした実証を増やすことで、ここでの検討結果の妥当性を確認することも必要である。仮に、合成指標がどの範囲にある際にどの形式が有効かを一般的に特定することができれば、多くの地域にとって有効な知見が得られる。以上、今後の課題としたい。

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氏（バイタルリード）、

に多くの助力を得た。付して謝辞と致します。

参考文献

- 1) 猪井博登, 藤本隆史, 土井健司: タクシー事業者の乗合事業への参入に関する態度・意向分析, 土木学会論文集 D3, Vol. 72, No. 5, pp. I_853-I_859, 2016.
- 2) 市川嘉一: 全国市区調査から見たコミュニティバス・乗合タクシーの導入・運行・利用の全国的実態に関する考察 — 「持続可能な生活交通」の視点に着目して —, 交通学研究, 第 56 巻, pp. 107-114, 2013.
- 3) Toth, P., and Vigo, D.: Vehicle routing: problems, methods, and applications, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2015.
- 4) Labadie, N., Prins, C., and Prodhon, C.: Metaheuristics for vehicle routing problems, Wiley-ISTE, 2016.
- 5) Golden, B. L., Raghavan, S., and Wasil, E. A.: The vehicle routing problem: latest advances and new challenges, Springer, 2008.
- 6) Gansterer, M., Hartl, R. F.: Collaborative vehicle routing: A survey, European Journal of Operational Research 268, pp. 1-12, 2018.
- 7) 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.
- 8) Letchford, A. N., and Salazar Gonzalez, J. J.: Projection results for vehicle routing, Mathematical Programming Series B 105, pp. 251-274, 2006.
- 9) Park, J., and Kim, B.I.: The school bus routing problem: A review, European Journal of Operations Research 202, pp. 311-319, 2010.
- 10) 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.
- 11) 中島秀之, 野田五十樹, 松原仁, 平田圭二, 田柳恵美子, 白石陽, 佐野渉二, 小柴等, 金森亮: バスとタクシーを融合した新しい公共交通サービスの概念とシステムの実装, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 71, No. 5, pp. I_857-I.888, 2015.
- 12) 西智樹, 小出智士, 大滝啓介, 大社綾乃: オンデマンド交通システムのための階層的車両配置最適化, 人工知能学会全国大会論文集, 第 33 回, 2019.
- 13) 落合純一, 金森亮, 平田圭二, 野田五十樹: 名古屋市のタクシー配車データを用いた Smart Access Vehicle Service の効率性評価, 人工知能学会全国大会論文集, 第 32 回, 2018.
- 14) 竹内龍介, 大蔵泉, 中村文彦: 運行特性を踏まえた DRT システムのコスト分析に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 20, No. 3, pp. 637-645, 2003.
- 15) 馮文浩, 谷本圭志, 丹呉允: 中山間地域におけるタクシー事業の供給能力に関する分析手法の提案, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 77, No. 3, pp. 280-290, 2021.
- 16) 馮文浩, 谷本圭志: 中山間地域におけるタクシー事業の供給能力と予約の調整に関する分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), (投稿中)

(2020.10.2)

ADVANTAGE OF SHARED TAXI IN RURAL AREAS FROM VIEWPOINT OF MINIMUM REQUIRED DRIVERS

TAKASHI FUJIMOTO, KEISHI TANIMOTO AND WENHAO FENG

Since the number of public transportation users is small in sparsely populated areas, taxi may be used as a transportation service. However, many taxi operators are facing a shortage of drivers, the sustainability of the services is concern. Therefore, it is desirable that even a small number of drivers can carry customers. A shared taxi can be considered as one of the effective operation modes, but there may be cases where the number of drivers required does not change even if the taxi is not shared. In this study, we specify the conditions under which a shared taxi is effective from the viewpoint of the number of drivers required to supply services. First, a model that represents the taxi operation is constructed by the mixed integer programming method. Then we examine the conditions where the shared taxi is effective in a case study.