包絡分析法を用いた
乗合タクシーの運用方法の決定方法

山本　雄大[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: M23J6022Y@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

乗合タクシーは走行距離の減少といった利点が事業者にある一方，利用者にとっては余分な所要時間を要する，乗車を希望する時刻から調整する必要があるなどの不便が生じる．このため，事業者は自身にとっての利点を損なわずに利用者の不便をどれほど許容した運用とするのかを適切に決定しなければならない．しかし，これらはトレードオフの関係にあるため，運用方法の決定は困難である．そこで本研究では，乗合タクシーの運行を再現する数理計画モデルと包絡分析法を組み合わせて運用方法を評価し，適切な運用を決定する手法を構築する．その際，この手法を実際の地域に適用し，その有効性を確認する．

Key Words : *shared taxi, operation rules, data envelopment analysis, mathematical model*

1. はじめに

近年，人口減少や自家用車の増加に伴って，路線バスをはじめとした公共交通機関の利用者が減少している．このため，全国でサービスの縮小や廃止が危ぶまれる事例が多く発生している．一方で，高齢化も同時に進行しており，日常的な移動手段を公共交通機関に頼っている高齢者も少なからず存在している．したがって，多くの地方自治体は，利用者数が少ない中，限られた財源のもとで地域の公共交通機関を確保し続ける必要がある．

このような背景のもとでは，定時定路線型の路線バスではなく，利用者の需要に応じて柔軟な運行ができるタクシーが有利と考えられる．一方で，一般的なタクシーは利用者を個別に輸送するため，運転手が不足する傾向にある現在においては安定してサービスを供給できるかが懸念となる．このため，タクシーを乗り合い制にし，複数の利用者を同時に運送できる乗合タクシーを導入する自治体が多く見られる．

乗合タクシーは，乗り合うことで必要な運転手の数や走行距離を抑えることができ，事業者に利点が生じる反面，利用者の利便性を損ないうる．具体的には，他の利用者の乗降車地点を経由しながら目的地に向かうことから，一般的なタクシーより多くの所要時間を要する．加えて，複数の利用者と相乗りをすることから，利用者が乗車する時刻を希望する時刻から調整する必要もある．これらの不便を利用者に過度に課せば事業者の利点は大きくなる一方，その不便を解消しようとすると乗り合いが生じない運行を目指すことになり，事業者の利点は少なくなるばかりか乗合タクシーの目的とも相容れない．このように，事業者の利点と利用者の不便の双方の観点を踏まえて，所要時間の増加や希望時刻からの乖離をどれほど許容した運用とするのかを事業者は適切に決定しなければならない．しかし，これらの観点はトレードオフの関係にあることから，運用方法の決定は困難と考えられる．

そこで本研究では，まずは運用方法が乗合タクシーの運行にどのような影響を与えるのかを再現するための数理計画モデルを活用する．これにより，事業者の利点と利用者の不便の関係を定量的に評価する．次いで，これらの関係データを用いて包絡分析法を適用し，事業者の利点と利用者の不便を総合的に勘案して，最も望ましい運用方法を導出する．以上のように，数理計画モデルと包絡分析法を組み合わせることで，運用方法を評価し，決定するための方法論を提案するのが本研究の目的である．さらに，実際の中山間地域における実際のデータを用いて，ここで提案する方法論の有効性を確認するとと

もに，その地域における望ましい運用方法の決定を実証的に試みる．

2. 本研究の考え方

(1) 既往の研究

これまでに乗合タクシーに関する研究は多数行われてきた．実態に着目した研究として，市川[1]は全国のコミュニティバスや乗合タクシーを導入している自治体を対象として，運行実態や利用実態に関して調査を行い，乗合タクシーの運行に係る費用の大部分を自治体による赤字補填で賄っていることを明らかにし，導入に当たっては財政負担の観点での検討が特に重要であることを指摘している．林[2]らは，いくつかの自治体を対象として乗合タクシーの需要を高齢化率に基づいて予測するとともに，導入に必要となるコストを明らかにし，時刻非固定・路線非固定の運行形態が望ましいことを明らかしている．長谷川[3]らはは，アンケート調査をもとに相乗りタクシーに関する利用者のニーズを年齢別に分析し，高齢になるほど価格より自宅へ送迎といった交通サービスを重視する傾向があることを明らかにしている．

モデル化に関する研究として，中島[4]らは都市部を対象に，車両と利用希望者をリアルタイムで把握し，複数の利用希望者の位置情報や目的地をもとに，訪問順序や運行経路を判断し，配車するシステムを構築している．西[5]らは，オンデマンド交通における配車を想定し，階層的リバランシング法を用いて車両の配置を最適化するモデルを構築している．藤本[6]らは，中山間地域における乗合タクシーを対象として，混合整数計画法を用いて，タクシーの運行を再現するモデルを定式化している．

乗り合い制を導入すると，事業者と利用者の間で出発時刻などの調整が必須となるが，それに着目した研究として古江[7]らはアンケート調査をもとに，生存時間分析を用いて，外出時刻の変更の受容が可能な時間をモデル化し，出発時刻を早める場合と遅らせる場合に分けて，外出時刻の変更の受容可能性について検討を行っている．

以上のように，多様な観点による研究がある．古江[7]らが着目したように，乗合タクシーの運用には事業者と利用者の間で出発時刻などの調整が伴う．しかし，具体的にどのような運用が望ましいかを扱った研究は見られない．そこで，本研究では，Feng *et al.*[7]が定式化したモデルを活用し，適切な運用方法を決定するための方法を提案する．

(2) 運用方法の定義

乗合タクシーは，乗り合うことで事業者に利点が生じる反面，利用者に不便を強いることになる．事業者の利点は走行距離の短縮が考えられる．利用者の不便に関する一つ目の観点は，利用者が乗車地から目的地へ直接向かった場合の所要時間に比べて，他の利用者の乗降車地を経由することで，どれだけ所要時間が増加するかである．（以後，「所要時間の増加」と言う）．二つ目は，利用者が乗車を希望する時刻からどれだけ乖離するか（以後，「希望時刻からの乖離」と言う）である．これら2つの時間が大きいほど利用者の不便は大きいため，事業者はこれらの時間をいたずらに大きくすることはできない．このため，これらの時間に上限を定め，この上限以下の範囲内で乗合タクシーを運用すると考えられる．以下では，これらの時間の上限を設定することを運用方法の決定と言い，上限それ自身を運用方法と言う．

(3) 運用方法の導出のプロセス

運用方法を導出するためにどのような検討を行うのかに関する全体像を**図-1**に示す．まずは，既存の数理計画モデルを活用して，異なる運用方法を設定した場合のもとでの乗合タクシーの運行を再現する．タクシーの運行という生産活動は，その活動への入力（例えば，タクシーの走行距離や利用者の所要時間など）と出力（タクシーの実車距離など）に区分でき，数理計画モデルでは走行距離や利用者の所要時間という運用方法によって異なりうる入出力の項目の数値を求める．これが図の左上に位置する数理計画モデルによる分析である．数理計画モデルについては3章で紹介する．

数理計画モデルを用いた計算には時間や労力を要する．そこで，いくつかの代表的な運用方法についてのみ数理計画モデルで計算した上で，その結果をデータとして線形混合モデルにより生産活動を表現する．これにより，任意の運用方法のもとでの生産活動を容易に求めることができる．これが図の右上に位置する線形混合モデルによる分析である．ただし，このアプローチが有効に機能するかは検証を要するため，この点については4章の前半で扱う．

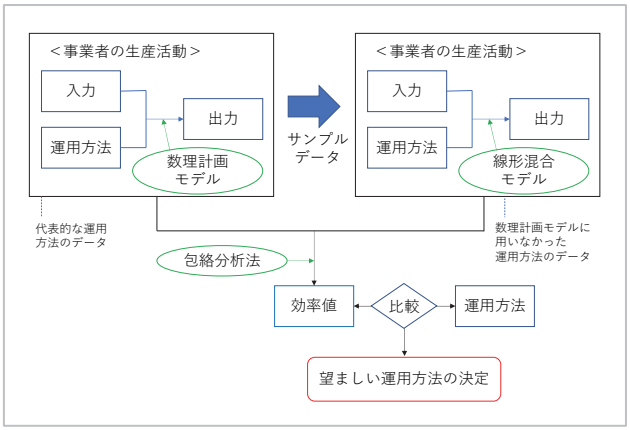


図-1 運用方法の導出のプロセス

表-1 乗合タクシーの入出力項目

	入力	出力
一般的な事業体	原料費，人件費	売上高
乗合タクシー（本研究）	走行距離，所要時間の増加，希望時刻からの乖離	実車距離

(4) 包絡分析法の概要

包絡分析法は，複数の事業体の生産活動を投入した資源から利益を産出する活動と捉え，この変換過程の効率性を相対評価する手法である．資源や労働力など生産のために投入する項目を入力項目，利益や売上高などの生産による成果を出力項目と表現する．本研究で扱う乗合タクシーの生産活動では，**表-1**に示す入出力項目になる．

3. 数理計画モデルの概要

表-1に示す入出力項目のうち，走行距離のみがモデルによる計算を要する．そこで以下では，既往の数理計画モデルを用いて，それを求める．このモデルは乗合タクシーを想定した上で，以下の前提に基づいている．

(1) モデルの前提条件

1) 利用者は運送を希望する時刻を事業者に伝えて予約をする．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．
2) 利用者は希望の時刻通りに運送してもらえるわけではない．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，利用者は予約を取り消すことはない．
3) 予約が入った利用者は全員運送する．
4) 車両には複数の利用者が乗り合えるが，収容人数以下でなければならない．
5) 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（以下，「始業」と言う）し，営業所に帰ってきて仕事を終える（以下，「終業」と言う）．

(2) モデル

任意の一日における乗合タクシーの運行を再現する数理計画モデルを示す．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$K = \{1,2,\cdots,m\}$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$N_1 = \{1,2,\cdots,n\}$，降車を$N_2 = \{n+1, n+2,\cdots,2n\}$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$U = \{2n+1, \ldots, 2n+m\}$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．以上の変数とパラメータを**表-2**にまとめる．

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．

$$\text{minimize} \sum_{i\in V}\sum_{j\in V} L_{ij}x_{ij} + \omega_1 \sum_{i\in N_1} \lambda_i + \omega_2 \sum_{i\in N_1} \varepsilon_i \tag{1}$$

Subject to:

$$\sum_{j\in V} x_{0j} = m \tag{2}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$u_0 + \sum_{i\in U} u_i = 0 \tag{18}$$

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

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

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

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

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実施することを表している．

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．

4. 運用方法の決定に関する実証分析

(1) 対象地域の概要

以下では，**図-1** に示すプロセスに基づいて運用方法を決定する．その際，広島県神石高原町の三和地区を対象とする．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 127.46km^{2}である．

表-2 モデルの記号

集合	説明
N	すべての乗客に関する作業の集合 $N = \{1,2,\cdots,2n\}$
N_1	乗客を乗車させる作業の集合 $N_1 = \{1,2,\cdots,n\}$
N_2	乗客を降車させる作業の集合 $N_2 = \{n+1, n+2, \cdots, 2n\}$
V	すべての作業の集合 $V = \{0,1,\cdots,2n+m\}$
U	運転手の終業の集合 $U = \{2n+1, 2n+2, \cdots, 2n+m\}$
K	運転手の集合 $K = \{1,2,\cdots,m\}$
パラメータ	
d_i	乗客$i(\in N_1)$の希望する出発時刻
d_{n+i}	乗客$i(\in N_1)$の希望する到着時刻
ε	希望時刻からの乖離の上限
λ	所要時間の増加の上限
c_{ij}	作業iから作業jへの移動に要する時間
L_{ij}	作業iから作業jへの移動に要する走行距離
M	十分に大きな値（big M）
Q	車両の収容定員
ω_1, ω_2	重み係数
変数	
t_i	乗客$i(\in N_1)$の実際の出発時刻
t_{n+i}	乗客$i(\in N_1)$の実際の降車時刻
ε_i	乗客$i(\in N_1)$の希望時刻からの乖離
λ_i	乗客$i(\in N_1)$の所要時間の増加
u_i	作業iの直後における車両の乗車人数
x_{ij}	作業iの次に作業jを実施するか否かのバイナリ変数，実施する場合に 1，そうではない場合 0
z_{ik}	運転手kが作業iを担当するか否かのバイナリ変数，担当する場合に 1，そうではない場合 0

(2) 数理計画モデルによる計算

a) 分析データ

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，乗

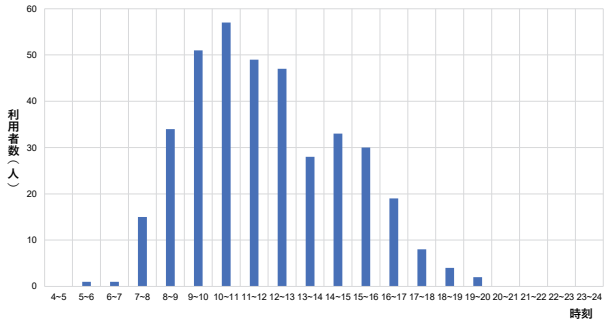


図-2　乗車時刻の分布

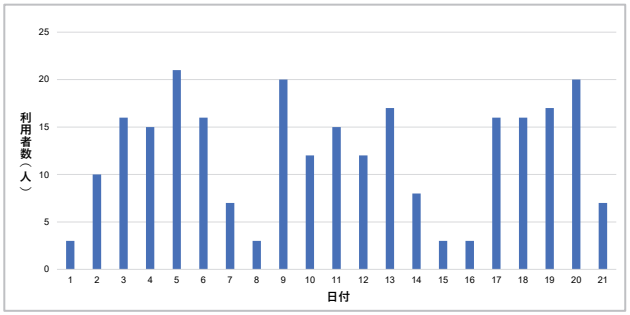


図-3　対象期間における利用者数

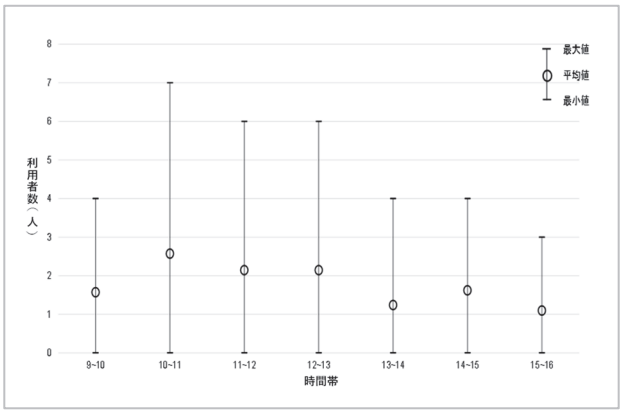


図-4　時間帯ごとの乗客数

り合いを要するのはこれらの時間帯である．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．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．

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．

表-4　線形混合モデルによる固定効果の結果

説明変数	係数 (t 値)
所要時間の増加(λ)	-0.045 (-4.382)***
希望時刻からの乖離(ε)	-0.076 (-4.983)***
利用者数(z)	-0.207 (-3.68)**
切片	1.343 (7.333)***
AIC	-584.1

注) ***p<0.001 **p<0.01 *p<0.05

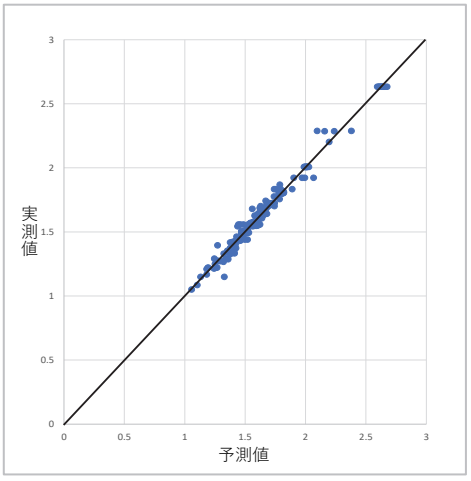


図-5　走行距離／実車距離の予測値と実測値の比較

b)　運用方法の設定と運転手の人数の設定

数理計画モデルで計算を行う際，所要時間の増加の上限λについては$\lambda = 5,10,15$分，希望時刻からの乖離の上限εについては，$\varepsilon = 10,20,30$分という 3 つの値をそれぞれ設定する．このように，λとεの 9 通りの組み合わせを数理計画モデルに適用して走行距離を導出する．

また，運転手数は最も制約の厳しい運用方法である$\lambda = 5$，$\varepsilon = 10$の運用方法の時，すべての日に実行可能な中で最も人数の少ない運転手数の 3 人とする．

(3)　線形混合モデルによる推定

上記の 9 通りの代表的な運用方法の結果を用いて，その他の運用方法における走行距離を線形混合モデルによって求める．具体的なモデルを次式で表す．ここでyは走行距離／実車距離，zは利用者数である．この実車距離は，すべての利用者が乗車地から降車地までの最短の距離で移動した場合の距離の合計である．

すべてのパラメータに固定効果とランダム効果があるものとし，日によってランダム効果が異なるものとする．

$$\ln(y) = a_0 + a_1 \ln(\lambda) + a_2 \ln(\varepsilon) + a_3 \ln(z) \quad (23)$$

分析結果を**表-4** に示す．ここで得られたモデルに基づいた走行距離／実車距離の予測値と実測値を比較した結果を**図-5** に示す．両者の相関係数は，0.991 と高く，良好に予測できていることが分かる．

表-6　運用方法と効率値の関係

		希望時刻からの乖離（ε）										
		10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
所要時間の増加（λ）	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	6	1	0.905	0.901	0.899	0.898	0.898	0.898	0.899	0.900	0.902	0.903
	7	1	0.902	0.881	0.876	0.873	0.871	0.869	0.868	0.868	0.869	0.870
	8	1	0.899	0.877	0.870	0.866	0.863	0.861	0.860	0.860	0.860	0.861
	9	1	0.898	0.875	0.867	0.863	0.860	0.858	0.857	0.857	0.857	0.858
	10	1	0.896	0.873	0.865	0.861	0.858	0.856	0.855	0.854	0.855	0.856
	11	1	0.896	0.871	0.863	0.859	0.856	0.854	0.853	0.853	0.853	0.854
	12	1	0.895	0.870	0.862	0.858	0.855	0.853	0.851	0.851	0.852	0.853
	13	1	0.895	0.870	0.861	0.857	0.854	0.852	0.851	0.851	0.851	0.852
	14	1	0.895	0.870	0.861	0.857	0.854	0.852	0.851	0.851	0.852	0.852
	15	1	0.895	0.870	0.861	0.857	0.854	0.852	0.851	0.851	0.852	0.853

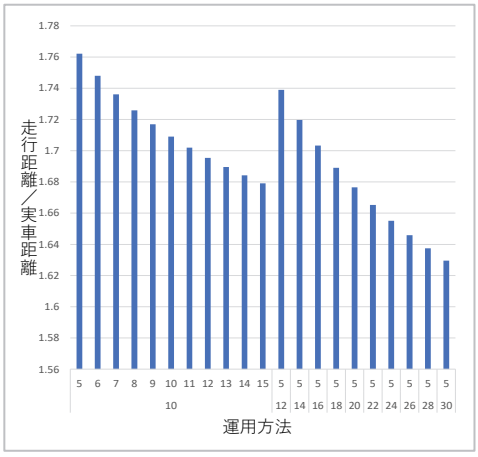


図-7　効率値が 1 の運用方法と走行距離／実車距離の比較

(4)　効率的な運用方法の特定

線形混合モデルを用いることで，数理計画モデルを用いずにその他の運用方法の走行距離を求めた．この値を用いて，包絡分析法を用いてすべての日に関する効率性を評価した．なお，実車距離は収入，走行距離は費用の代理変数であり，希望時刻からの乖離と所要時間の増加は利用者にとってのコストである．

包絡分析法はCCR (Charnes-Cooper-Rhodes)モデルが広く用いられるが，このモデルは規模の収穫が一定の仮定，すなわち，希望時刻からの乖離や所要時間の増加などの入力と走行距離という出力に比例の関係があるとの仮定がおかれる．しかし，希望時刻からの乖離や所要時間の増加は一定の範囲まではその上限を大きくすることで走行距離を短縮する効果が期待できるが，その範囲を超えると効果は見込めなくなる．これは，希望時刻からの乖離や所要時間の増加は乗り合いが成立するように利用者の時刻を調整することを意味するが，ある上限のもとで可能な乗り合いがすべて成立していれば，それ以上に上限を大きくしても新たな乗り合いが成立しなくなるためである．このため，規模の収穫が可変の BCC (Banker-Charnes-Cooper)モデルを用いる．評価を行い，運用方法ごとにすべての日に関して平均値を求めた結果を**表-6** に示す．

効率値は大きい方がよいが，この表より効率値が最大である 1 をとる運用方法は多い．そこで，これらの中からより適切な運用方法を絞り込む．事業者としては効率値が同じであれば，なるべく走行距離が小さい方がよい．ただし，走行距離は実車距離によって大きさがばらつくため，実車距離で基準化した走行距離，すなわち，走行距離／実車距離の平均値を求め，これが小さい方が望ましいとする．ここで，**図-7** に走行距離／実車距離を示す．横軸は効率値が 1 をとる運用方法である．

図より，効率値が 1 であっても走行距離／実車距離には差がある場合が多いことが分かる．すると，効率値が 1 の中で走行距離／実車距離が最小である運用方法を見出すと$(\lambda, \varepsilon) = (5,30)$が得られる．したがって，この運用方法が適切な運用方法である．

5.　おわりに

本研究では，数理計画モデルと包絡分析法を組み合わせて，乗合タクシーの運用方法を決定する方法を提案した．その上で，広島県神石高原町の三和地区を対象に実証分析を行った．その結果所要時間の増加 5 分，希望時刻からの乖離 30 分が適した運用方法であると決定することができた．

本研究では，運転手の人数が一定であるとの仮定で計算した．最近では，運転手の人数が減っているため，ここで提案した方法は運用方法のみならず，どれほど運転手が減っても効率的な運用が可能か．また，運転手が少なくなると，それに応じて，どの(λ, ε)が適切かを評価しうるかを検証することが重要である．今後，このような観点を含めた検討を行う必要がある．

謝辞：本研究はJSPS科研費JP23H00197の助成を受けた．付して謝辞と致します．

REFERENCES

1)　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. [Ichikawa, K.: A Study on the Nationwide Status of Introduction, Operation, and Use of Community Buses and Shared Ride Taxis from the Perspective of a Nationwide Municipal Survey -Focusing on the Perspective of "Sustainable Livelihood Transportation"-., *The Japanese journal of transportation economics*, Vol. 56, pp. 107-114, 2013.]

2)　林光伸，湯沢昭：デマンドバス導入のための需要予測と運行形態の評価に関する―考察，日本都市計画学会都市計画論文集, No. 41-3, No. 5, pp. 55-60, 2006. [Hayashi, M. and Yuzawa, A.: Consideration on Demand Forecast

and Evaluation of Operation Type for Introduce DRT *Journal of the City Planning Institute of Japan* No. 41-3, pp. 55-60, 2006.]

3) 長谷川正利，中村俊之，栗生啓之，鈴村雅彦，森川高行：地方都市での相乗りタクシー導入時における利用者ニーズの比較分析，土木学会論文集 D3, Vol. 76, No. 5, pp. I_1417-I_1427, 2021. [Hasegawa, M., Nakamura, T. Aou, Y., Suzumura, M. and Morikawa, T.: Comparison analysis of user service need for implementing share taxi, *Journal of Japan Society of Civil Engineers D*3, Vol. 76, No. 5, pp. I_1417-I_1427, 2021.]

4) 中島秀行，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, Vol. 71, No. 5, pp. I_875-I_888, 2015. [Nakajima, H., Noda, I., Matsubara, H., Hirata, K., Tayanagi, E. Shiraishi, Y., Sano, S., Koshiba, H. and Kanamori, R.: Concept and implementation of a new public transportation system that unifies the bus and taxi services, *Journal of Japan Society of Civil Engineers D*3, Vol. 71, No. 5, pp. I_875-I_888, 2015.]

5) 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. [Nishi, T., Koide, S., Otaki, K. Okoso, A. and Toyota Central R&D Labs., Inc.: Nested Rebalancing Optimization for Mobility on Demand *The 33rd Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence*, 2019, pp. 55-60, 2006.]

6) 藤本隆志，谷本圭志，馮文浩：中山間地域における運転手削減の観点から見た乗合タクシーの利点，土木計画学研究・論文集， Vol. 64, CD-ROM, 2021. [Fujimoto, T., Tanimoto, K. and Feng, W.: Advantage of shared taxi in rural areas from viewpoint of minimum required *Proceedings of infrastructure planning* Vol. 64, CD-ROM, 2021.]

7) 古江克成，桑野将司：中山間地域における外出時刻変更の受容可能性に関する分析，農村計画学会誌，Vol. 38, No. Special_Issue, pp. 156-162, 2019. [Furue, K. and Kuwano, M.: An Analysis on Acceptability of Departure Time Change in Rural Area *Journal of Rural Planning Association* Vol. 38, No. Special_Issue, pp. 156-162, 2019.]

8) Feng, W., Tanimoto, K., and Fujimoto, T.: Evaluating Shared Taxis in Rural Areas from the Perspective of Number of Drivers, Transportation Research Record, 2023.8.

Evaluating Operation Rules of Shared Taxi Services using Data Envelopment Analysis

Takehiro YAMAMOTO, Keishi TANIMOTO and Wenhao FENG

While shared taxis have the advantage of reducing mileage for business operators, there are inconveniences for users such as extra travel time and the need to adjust from the desired boarding time. For this reason, the operation rule should be determined from viewpoint of how much user inconvenience is tolerated without sacrificing operators' benefits. However, it is difficult to determine the rule because these are in a trade-off relationship. In this study, we construct a method to identify the appropriate operation by combining the mathematical model that reproduces the operation of shared taxis and the data envelope analysis. Then we apply this method to an actual area in order to confirm its effectiveness.