

プローブパーソン調査とSP調査による新交通手段の導入可能性の分析*

Evaluation of introducing new travel mode by using probe-person-based stated-preference survey*

定金乾一郎**・小林勇介***・山中一平****・日下部貴彦*****・朝倉康夫*****

By Kenichiro SADAKANE**・Yusuke KOBAYASHI***・Ipppei YAMANAKA****

Takahiko KUSAKABE*****・Yasuo ASAKURA *****

1. はじめに

近年、自動車依存型のライフスタイルによる環境悪化や高齢化による交通弱者の増加等の問題が指摘されており、これらの問題を改善する新たな交通体系の確立が求められている。新たな交通体系構築の一環として、都心部における自動車利用の代替交通手段となる環境負荷の少ない新交通手段の開発が進められている。本研究ではこの手段をLSPTM (Low Speed Private Travel Mode; 低速度移動手段) と呼ぶ。LSPTMとは、例えばi-REAL¹⁾のような、主に短距離から中距離の移動を対象とした低速度の一人乗りの交通手段である。鉄道等の公共交通と組み合わせた利用により、都市部での渋滞緩和や環境汚染物質排出量削減の効果が期待される。また、操作性の高さや自動制御技術等により、高齢者の交通行動を助ける交通手段としての導入も期待できる。

本研究ではLSPTMの都心部への導入可能性を検討するために、計画変数の様々な設定値での導入効果の評価を行うための方法を構築することを目的とする。本研究は、SP(Stated Preference)調査により利用者の交通行動モデルのパラメータを推定し、それを用いてシミュレーションを行う。これにより導入直後における需要量等の評価指標を算出する。また、代替交通手段であるLSPTMの導入状況の現実感を高め、SPデータの信頼性を上げるために、プローブパーソン(Probe Person ; PP)調査と連携したSP調査手法を開発した。

*キーワード：交通行動分析、交通行動調査、交通手段選択、プローブパーソン調査

**学生員、学士、神戸大学大学院工学研究科

(神戸市灘区六甲台町1-1,

TEL:078-803-6360, FAX:078-803-6360)

***非会員、学士、神戸市

****非会員、工修、阪急電鉄株式会社

*****学生員、工修、神戸大学大学院工学研究科・日本学術振興会特別研究員DC

*****正員、工博、神戸大学大学院工学研究科

2. PP+WEB-SP調査手法の開発

本研究では、LSPTMの導入時における需要量を把握するために、WEB上で行うSP調査手法を開発し、調査を実施した。SP調査における被験者の選好意識は、被験者が、実験者が提示した仮想状況をいかに認識したかに依存する。この被験者が認識した仮想状況と、被験者の実際の行動や将来時点における代替案導入状況に差が生じることにより、無制約バイアスと呼ばれるSPデータの偏りが生じる。実際に代替案を導入した将来の状況の現実性を高めることが無制約バイアスを低減させることになり、信頼性の高いモデルの構築には必要となる。

本研究では、PP調査によって被験者の行動軌跡を取得し、その軌跡上での選好意識を尋ねることで、仮想状況の現実性を高めるSP調査手法を開発した。本手法を以下ではPP+WEB-SP調査と呼ぶ。被験者は自己の実際の行動軌跡上での設問に回答することになり、その状況を思い浮かべた上での回答が期待されるため、仮想状況の現実性は高まると考えられる。図-1に開発した調査手法の流れを示す。

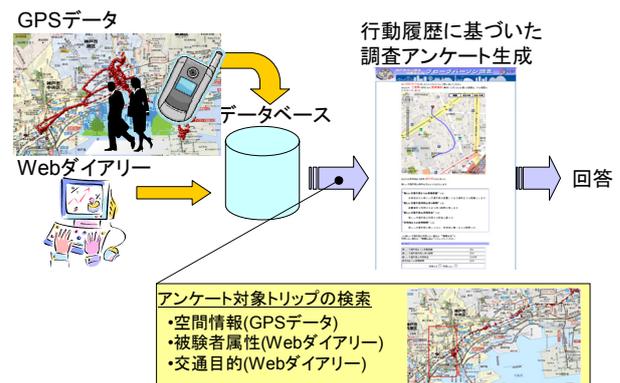


図-1 調査手法のフロー

PP+WEB-SP調査は次のような①～④の手順で行うものである。①、②が従来からあるPP調査であり、③、④が新たに開発したWEB-SP調査である。

被験者はGPS機能を備えた携帯電話をトリップの起点、終点にて操作。

1日の全トリップ終了後、PC上でWEBダイアリにログイン後、トリップ目的、交通手段の情報を補完する。実験者は取得した軌跡データとWEBダイアリデータからSP調査対象トリップを抽出し、アンケートページを生成。

被験者へのアンケートページ提示及び回答データの収集。

本手法ではWEBアンケートページ上の地図に移動軌跡を表示する。地図への表示はGoogle Maps API²⁾を用いて行った。本手法を用いることにより以下のことが可能となる。

- WEB上で調査を実施することによる調査労力の削減
- 仮想状況の現実感の向上

仮想状況の現実感が向上すれば、SPデータの信頼性が向上すると考えられる。これについてはKUSAKABE³⁾によって、その有効性が述べられている。

調査の対象となるトリップデータはGPSデータを調査条件に従い抽出した後、移動平均による補正を行い、被験者に提示する。ここで、得られたGPSデータには誤差が含まれており、そのまま表示すれば移動軌跡が煩雑なものになってしまうため、移動平均による補正を行った。

3. 調査の実施

(1) 調査概要

LSPTMの導入分析に用いる選好意識データを取得するため、被験者100名に対し、PP+WEB-SP調査を実施した。SP調査は「徒歩からLSPTMへの転換」を対象としたものである。鉄道端末交通手段としての徒歩を対象とし、「神戸市中心部における徒歩移動者は、どのような要因でLSPTMを利用するか」を把握することを目的としている。調査は表-1に示す概要で実施した。一週間のPP調査により被験者の行動軌跡を取得し、その後SP調査を実施した。前章で述べたように、LSPTM導入状況を被験者が現実的に想像していれば、SPデータの無制約バイアスは低減されると考えられる。本調査において、移動軌跡データを提示することで被験者の想定する仮想状況の現実感の向上が期待されるが、被験者がトリップを行ってから回答するまでの経過時間が長ければ、記憶が薄れ、現実感が低下すると考えられる。そのため、PP調査の期間中に対象トリップを抽出し、該当トリップが行われた翌日および翌々日にSP設問を提示した。

PP調査後に被験者に提示するSP設問は、選択肢属性値が異なる条件下において、LSPTMと徒歩の二つの交通手段のどちらを選択するかというものである。設問に使用した選択肢属性の設定を表-2に示す。表中の「待ち時間」はLSPTM設置場所において利用するまでに待つ時間である。「LSPTM所要時間」はLSPTMを利用した場合の

表-1 調査概要

調査期間	2009年9月7日～9月20日 (PP調査:7日～13日)
調査対象地域	神戸市中心部
被験者数	100名
応募条件	期間中少なくとも1回以上 神戸市中心部へ私用目的で移動

表-2 LSPTM選択肢属性

料金	50円	100円	150円
待ち時間	0分	3分	5分
LSPTM 所要時間	取得徒歩時間の1/3		取得徒歩時間の2/3
アクセス距離	0m	50m	100m



図-2 提示したSP設問ページ

目的地までの所要時間であり、本研究では対象徒歩トリップデータの始点から終点までの所要時間の1/3、2/3と設定した。「アクセス距離」とは、始点からLSPTM設置場所までの距離を示す。

条件は表-2の各選択肢属性値をランダムな組み合わせとして被験者に提示する。その条件下でLSPTMと徒歩のどちらを選択するかという設問を対象トリップ1つに対し、5回行った。SP設問は図-2のようなものを提示している。

(2) 結果の概要

PP調査により取得されたトリップデータを表-3に示す。表中の「全トリップ数」とはPP調査のWEBダイアリーに記述された全トリップの数であり、GPSのエラー等により行動軌跡が取得されていないものも含む。一方「有効トリップ観測数」とは、移動軌跡データが観測されたものを示す。このうちSP調査の対象となる神戸市中心部流入トリップは786トリップで、有効トリップ数の42%であった。SP調査の対象トリップの条件は次の通りである。

- 所要時間が5分以上の徒歩トリップ
- 目的地及び出発地が対象エリア内
- 同一トリップの場合2回まで提示

①に関しては、徒歩5分以内の移動からLSPTMへの転換は現実的に考えにくいいため、対象トリップは5分以上とした。②の条件により、神戸市中心部エリアにおける移動を抽出している。③については、通勤トリップ等の日常的に行われるトリップの場合、その全てにSP調査を提示すれば、被験者負担が大きくなり、回答データの信頼性が低下すると考えられるため、このような条件を設けた。

神戸市中心部流入トリップ数786の内、実際にSP調査の対象としたのは85トリップであり、被験者1人当たり5サンプルのSPデータを取得しているため、分析サンプル数は425となった。

表-3 取得トリップデータ

全トリップ数	2173
1人当たり1日平均トリップ数	3.1
有効トリップ観測数	1861
神戸市中心部流入トリップ数	786
SP調査対象トリップ数	85

(3) 非集計行動モデルによる分析

得られたSPデータより、LSPTMと徒歩の二項ロジットモデルを推定する。モデルの効用関数を次式に示す。

$$V_{LSPTM} = \beta_0 + \beta_1 x_{cost} + \beta_2 x_{w_time} + \beta_3 x_{l_dis_time} + \beta_4 x_{access_time}$$

$$V_{walk} = \beta_5 x_{walk_time}$$

(1)

- ここに、 V_{LSPTM} : LSPTMの効用関数
 V_{walk} : 徒歩の効用関数
 x_{cost} : LSPTM利用料金[円]
 x_{w_time} : 待ち時間[分]
 $x_{l_dis_time}$: LSPTM所要時間[分]
 x_{access_time} : アクセス時間[分]
 x_{walk_time} : 徒歩所要時間[分]
 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$: 各変数に対するパラメータ

SP調査ではアクセス距離を取得したが、モデルにおいてはこれを時間に変換したアクセス時間を用いた。これは、アクセス距離に対する選好が被験者の徒歩速度の違いから誤差が生じていると考えられるためである。この誤差の影響をできるだけ小さくするためにPP調査より得られた移動軌跡データから各被験者の平均徒歩速度を算出し、アクセス時間を算出した。最尤推定法によるパラメータの推定結果を表-4に示す。

自由度調整済決定係数 \bar{r}^2 は0.428であり、モデルは十分に説明力を持っていると言える。

表-4 パラメータ推定結果

説明変数	標準化係数	t値
定数 β_0	0.242	0.546
料金[円] β_1	-0.018	-4.845
待ち時間[分] β_2	-0.256	-3.736
LSPTM所要時間[分] β_3	-0.161	-2.212
アクセス時間[分] β_4	-1.010	-4.299
徒歩所要時間[分] β_5	-0.199	-4.529
サンプル数	425	
自由度調整済決定係数 \bar{r}^2	0.428	

4. シミュレータによる需要分析

本章では、LSPTM導入後における需要分析を行うためのシミュレータの開発について述べ、分析を行う。シミュレータはLSPTMの利用料金や待ち時間等の計画変数を与えることにより、利用者数や収益等の計画評価指標を算出し、LSPTMを導入した場合に生じる効果を予測するものである。シミュレータは神戸市の道路ネットワークを用いることで、対象地域でのネットワーク上での利用者(エージェント)の行動を推定する。これによりLSPTMの導入によって実際のネットワーク上でどのような交通行動がなされるかを把握する。シミュレーションではターゲットトリップを行うエージェントの数と分析対象時間を所与とし、計算を行う。以下にシミュレータの設定について述べる。

(1) LSPTMの運行形態

シミュレータはLSPTMを1地点に配備するケースを取り扱う。LSPTMの機能は以下の3点を想定し、シミュレーションを行う。

- a) 乗り捨てが可能であり、自動制御により駐車場に返ってくる。
- b) LSPTMの現在位置及び待ち時間は携帯電話の画面等で正確に知ることが出来る。

- c) 待ち時間がある場合、利用希望者は最初に戻ってくるLSPTMの予約をすることができる。

a)のように、LSPTMは駐車場から目的地まで利用者を運んだ後、また駐車場に戻ってくるという運行形態をとり、1台を複数人で共有するシステムを想定している。

(2) 利用者行動のモデル化

シミュレーションにおけるエージェントは a) 出発 b) 目的地選択 c) 手段選択の順に行動を行う。

a) 出発

シミュレーションでは、最初にエージェントの出発時刻をランダムに与える。その次に出発地選択モデルにより出発地を決定し、その地点からエージェントが行動を開始するものとする。エージェントの出発地は神戸市中心部の三宮駅付近に設定する。出発地選択モデルは、エージェントの出発地分布が、実際に発生する鉄道端末徒歩トリップの出発地分布と同様になるように、PP 調査データを用いて出発地ノードを設定し、そのノードの選択確率を算出するものを構築した。

b) 目的地選択

目的地選択モデルは、SP 調査から得られたパラメータを用いて交通手段の状態による目的地の合成効用を構築し、目的地ノードの選択確率を算出する。ここで、目的地ノードとして、目的地の候補となる地点を全て列挙すれば、膨大な計算コストを要するため、対象地域を多数のエリアに分割し、エリアの代表点をエリア内の選択肢集合が集約されたものとして扱う。エリア分割は道路ネットワークにおけるノードを母点するボロノイ分割によって行った。

目的地ノード i を選択した場合の LSPTM と徒歩の手段選択は式(1)を用いる。式(1)におけるパラメータの値は表-4の推定値を用いる。手段ごとの効用関数を用いて、ノード i のログサム変数は次式のように求められる。

$$V_i = \ln\{\exp(V_{LSPTM}^i) + \exp(V_{walk}^i)\} \quad (2)$$

ここで、各ノードの属するボロノイ領域内の選択肢集合の数をそのノードに固有な効用であると仮定し、各ノードの選ばれやすさをボロノイ領域の面積による重み付けにより表現する。これは、一定面積内に存在する目的地の選択肢数が、全エリアに渡って均一であると仮定すれば、ボロノイ領域の面積はその領域に含まれる目的地の選択肢集合の総数と考えることができるからである。これらの手順により、ノード k の目的地選択確率は次式により表される。

$$P_{Destination=k} = \frac{W_k \exp(V_k)}{\sum_{Vi} W_i \exp(V_i)} \quad (3)$$

W_i : ノード i の重み

c) 手段選択

エージェントの手段選択は式(1)の効用関数を用いた選択確率によってランダムに選択する。

(3) シミュレータの計算手順

a) 入力変数

シミュレータに入力する変数は①計画変数、②需要規模、LSPTMの性能、④運用コストの4つのグループに大別される。①は、導入主体が操作可能な変数であり、LSPTMの利用料金、LSPTMの配置台数、駐車場の設置場所の3つである。②は、単位時間に発生するターゲットトリップの数のことであり、シミュレーションで発生させるエージェントの数となる。③は、マシンとしてのLSPTMの性能を表し、速度、燃費、CO2排出原単位の3つである。④は、導入および運営にあたって発生するコストであり、LSPTMの単価及び償却期間、駐車場の建設費用及び償却期間、維持管理費用の3つである。

b) 出力変数

本研究において、シミュレータから算出される変数はLSPTM利用者数、所要時間短縮量、CO2排出量、料金収入、総コスト、収益の6つである。②の所要時間短縮量はLSPTMを利用することで所要時間がどれだけ短縮できたのかを表す。⑤の総コストは単位時間当たりの運営にあたって発生するコストの合計であり、の料金収入との単純差が⑥の収益となる。

c) 計算手順

シミュレータでは、需要規模に応じたエージェントを発生させ、各エージェントの出発時刻、出発地点をランダムに与える。図-3は各エージェントが、それぞれの出発時刻、出発地点を出発した後の行動をフローチャートにしたものである。まず、エージェントは前節のa)に記した流れで出発地を選択する。出発地点において、駐車場までのアクセス時間を算出し、待ち時間を考慮して目的地選択及び手段選択を前節b) c)に記した流れで行う。手段が決定されると、各エージェントは最短経路を通り目的地まで向かう。

図-4は各LSPTMの動きをフローチャートにしたものである。LSPTMの配置台数は所与であるため、全てのLSPTMが利用されている状況において、LSPTMが駐車上に戻ってくるまでの待ち時間が生じる。これは、混雑に

よる影響を表しており、エージェントの手段選択行動に影響する。

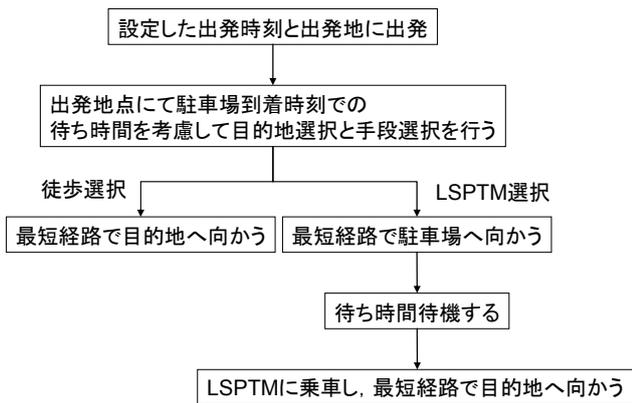


図-3 各エージェントの行動フローチャート

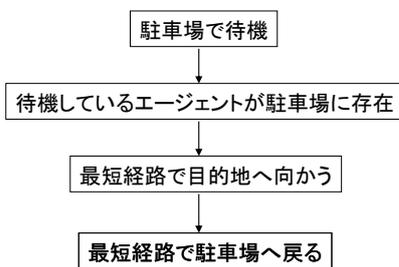


図-4 各LSPTMの動きのフローチャート

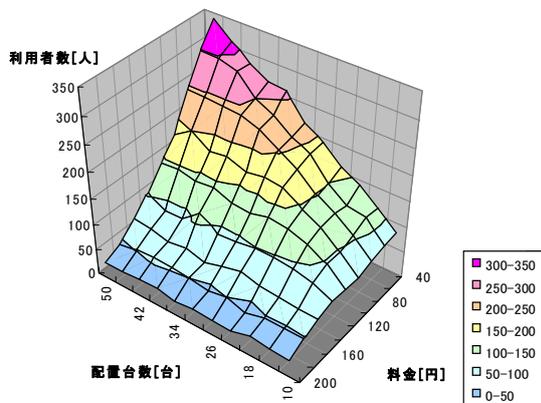


図-5 評価指標3次元グラフ

(4) 最適導入計画案の提案方法

シミュレータにより算出した指標を用いて、最適導入計画案を評価する。図-5はLSPTM利用料金及び配置台数の変化による利用者数の変動を表した3次元グラフである。図-5における縦軸が評価指標を表し、それぞれの評価指標ごとにこのようなグラフを描くことができる。ここで、最適な導入計画案を算出するために、各評価指標の出力結果を用いた制約条件付きの最適化の方法論を提案する。例として、導入主体が民間企業である場合、「一定の消費者便益（例えば所要時間短縮量 1000 分以上）の確保と、環境基準（例えば CO2 排出量 20kg 以

下）を達成した上で、収益を最大化する」のような戦略が考えられる。この場合、評価指標が所要時間短縮量であるグラフ上において値が 1000 分以上になる領域と、CO2 排出量のグラフ上において値が 20kg 以下となる領域が、それぞれ制約条件領域となる。そしてそれらを収益のグラフ上にオーバーラップし、それらの共通領域内において収益の値を最大にするときの料金と配置台数の組み合わせが、求める最適解となる。

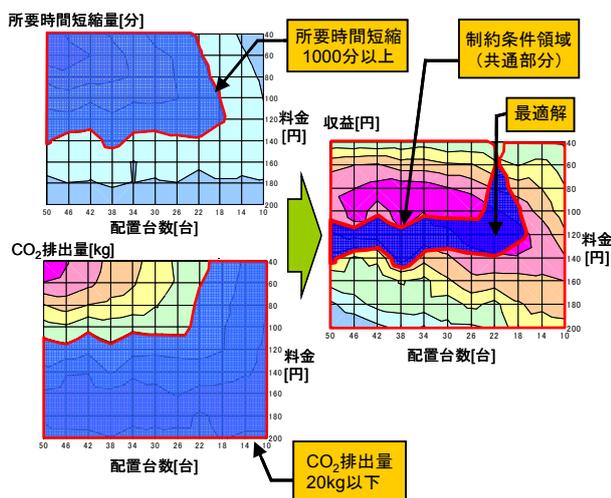
(5) 計算例

シミュレータへの入力変数値を表-5のように設定し、シミュレーションを行った。図-6はこの計算結果を示したものである。

図-6より、この制約条件下での利用料金と配置台数の最適な組み合わせは利用料金120円、配置台数22台のときとなった。このように、本手法を用いれば制約条件を満たす導入計画案を算出することができる。上記の例では、計画変数を利用料金と配置台数に設定し、それぞれの値を求めているが、この計画変数及び制約条件とする評価指標を導入主体の戦略に応じて設定することで、様々な最適計画案を算出することが可能である。

表-5 シミュレーション入力変数

入力変数		設定値
計画変数	LSPTM利用料金 [円]	40円～200円を20円刻みで変化
	LSPTMの配置台数 [台]	10台～50台を4台刻みで変化
	駐車場の設置地点	出発地ノード22箇所から選択
需要規模	時間当たりのターゲットトリップの数	3000人
LSPTM性能	速度 [km/時]	15km/時
	燃費 [km/円]	0.296km/円 (=35.5[km/l]/120 [円/l])
	CO2排出量原単位 [g-CO2/km]	65g-CO2/km
運用コスト	LSPTMの単価[円]	800万円
	および償却期間 [年]	および5年
	駐車場の建設費用[円]	1億円
	および償却期間 [年]	および10年
	維持管理費用 [円]	0.5円/km



図ー6 制約条件付きの収益最大化

5. まとめ

本研究では、SP設問の現実感の向上を図り、信頼性の高いSPデータの取得が可能と期待されるPP+WEB-SP調査手法を開発・実施した後、取得SPデータから推定される手段選択モデルを用いてシミュレーションを行った。また、シミュレーションから得られる結果を用いて、最適な導入計画を提案する方法を示すことができた。本研究では導入計画の一例を示し、その最適計画案を示した。

本研究では、エージェントの交通手段選択の際に、混雑による待ち時間を記述できた。また、目的地選択モデルに合成効用を用いることで、LSPTMの存在による目的地選択確率の変化を考慮した。一方、本研究において考慮できなかった要素として以下のものが存在する。

- ・個人属性やトリップ目的を考慮していない
- ・駐車場が1地点の場合しか扱えない
- ・出発時刻を一様乱数により与えているため、時間帯別の変動を表現できていない

これらの要素を考慮したより汎用性の高いシステムの構築が今後の課題である。

謝辞

本研究で実施したPP+WEB-SP調査は、株式会社 都市交通計画研究所の支援を受けて行ったものである。この場を借りて、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) TOYOTA : i-REAL , http://www2.toyota.co.jp/jp/tech/p_mobility/i-real/ , アクセス日 : 2010年7月23日

- 2) Google Maps API , <http://code.google.com/intl/ja/apis/maps/index.html> , アクセス日 : 2010年7月23日
- 3) Kusakabe,T.et.al : Development of Stated-Preference Survey System on the Combined WEB and GPS Mobile Phones , SEVENTH TRIENNIAL SYMPOSIUM ON TRANSPORTATION ANALYSIS (TRISTAN) , p p.473-476,2010.