

# 交通機関選択意識のモデル化とその検証

佐藤 馨一，五十嵐 日出夫

## 1. 交通機関選択モデルの体系化

マーケティングリサーチの世界では、製品と商品を厳密に区別している。製品は工場で作られ、品質や原価等いろいろな評価基準が用いられている。これに対して商品の評価基準はただ1つ、「売れるか、売れないか」しかない。

いかに品質の優れた良い製品であっても、売れなければ商品としての価値はゼロである。良い製品が必ずしも売れる商品とならないことに経営者の悩みがあり、マーケティングリサーチという学問の存在意義がある。

眼を都市計画の分野に向けると、ここでも同様なことが問題になっている。昭和30年代までの交通機関は大部分が公有されており、個人が自由に利用できる交通手段は自転車か、自分の足しかなかった。したがってこの時代の交通事業者は利用者のニーズではなく、お互いの領域を尊重しあうことによって十分利益を上げることができた。

利用者の立場からすると他の交通手段を選択する自由がないため、公共交通機関を利用せざるを得なかった。これらの人々を交通計画学ではCaptive層（捕われの身の人々）と名づけている。

これら捕囚の人々は自家用自動車を手に入れることによって自由の身に、すなわち交通手段を選択できるChoice層へと変身した。

昭和40年代以降の公共交通問題はここから始まっている。利用者の減少に気づいた公共交通事業者は、人々が選択したくなる交通サービスを提供することよりも、自家用車を保有し、運転することを抑制するキャンペーンを展開した。いわゆるイコールフィッティング論や都心

さとう けいいち、いがらし ひでお 北海道大学 工学部

〒060 札幌市北区北13条西8丁目

乗入れ税などの構想がこれに相当しよう。

しかし商品としての魅力のない製品は売れ残り、空席が滞貨し、わが国最大の公共交通事業者であった国鉄は分割・民営化された。

都市計画・交通計画において交通機関選択モデルが注目され、多くのモデルや研究論文が発表されているのは以上のような背景があるからである。図1はこれら交通機関選択モデルを、データの特性と基礎とする数理モデルによって分類したものである。その内容を要約すると以下ようになる。

### (1) 集計データと非集計データ

パーソントリップ調査は都市圏に居住する人々の交通行動を調べるものであり、個人ごとにデータがファイル化されている。従来の交通機関選択モデルは個人のデータをゾーンごとに集計し、構築してきた。したがってこのモデルには距離や料金などの交通条件は反映されているが、年齢や性別、自家用車の保有などの個人属性は考慮されていない。

このため1980年代になると交通条件はもとより、個人属性までを取りこんだ非集計行動モデルが開発された。このモデルは理論的前提が明確なこと、必要サンプル数が少ないこと、きめの細かい交通サービスに対応できることなどの理由により急速に普及した [1]。しかし補完データの作成に手間がかかり、新設される交通機関の選択率を予測するには問題のあることも指摘されている。

### (2) 意識データと行動データ

人間は一般に、意識の指示によって行動をコントロールする。社会学や心理学において意識調査を実施するのはこのためであり、交通工学でも種々の意識調査が実施されている。例外的に無意識の行動も存在するが、これは条件反射的であり、選択行動とはみなしえない。

一方、自動車や歩行者の交通量を数える非意識的な調査もある。筆者らは交通計画に用いるデータを早くから「意識データと行動データ」に区別し、それぞれ次のよ

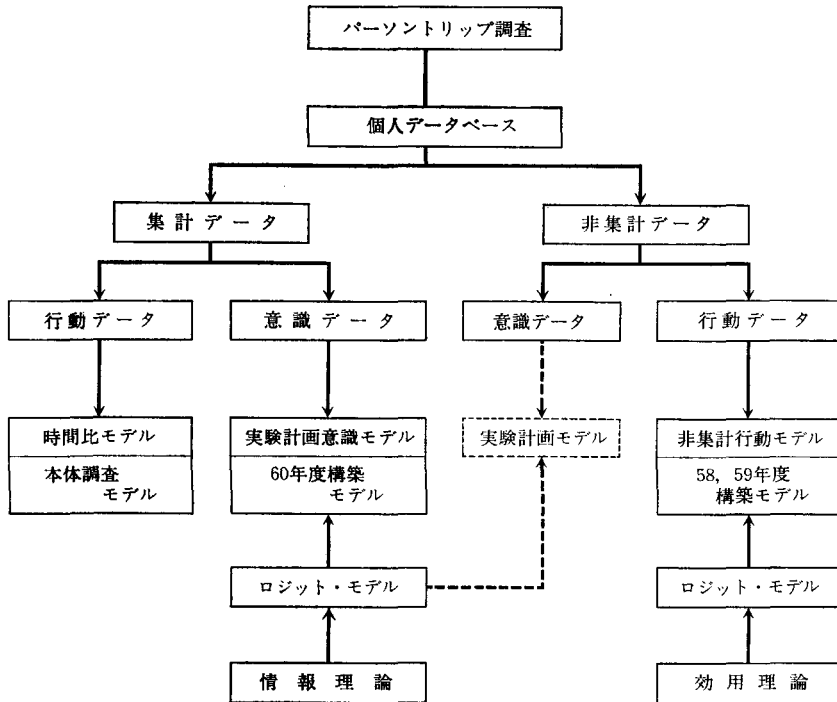


図 1 交通機関選択モデルの体系図

うに定義してきた [2].

①意識データ：被験者の意識、価値観、記憶などについて調査し、得られたデータ

②行動データ：自動車交通量や歩行者数のように事実について調査し、得られたデータ

ところで森川は、アメリカにおける意識データの適用事例とその課題について報告している [3].

ただしアメリカでは行動データをRPデータ、意識データをSPデータと呼称している。

③RPデータ (Revealed Preference Data)

市場において顕在化 (revealed) した消費者の行動結果を表わす情報

④SPデータ (Stated Preference Data)

市場における現存の代替案の選好結果ではなく、仮想または実存する代替案に対する選好の意思に関する情報

交通機関選択モデルを行動データではなく、意識データを用いる長所をまとめると次のようになる。

- i) データの範囲を拡張することができる。
- ii) 工夫によって要因間の重共線を避けることができる。
- iii) 安全性や快適性などの定量化しにくい要因を取り

入れることができる。

iv) 選択肢を明示できる。

v) 仮定の代替案(たとえばリニアモーターカーなど)に対する選択意識を知ることができる。

## 2. 実験計画モデルの理論構成

意識データを用いて交通機関選択するとき、いくつかの課題が存在する。筆者らはこれらの課題を実験計画法の手法を応用して解決してきた。以下においてその内容を紹介します、あわせて実験計画モデルの理論構成を説明する。

### (1) 意識データの回答誤差

意識データを用いてモデルビルディングを行なうとき最も課題となることはデータの信頼性である。特に被験者が不まじめに答えているとか、意識と行動の不一致などの、いわゆる回答誤差の存在が問題になる。行動データの場合に問題となるサンプリング誤差は統計的に取り扱えるのに対して、回答誤差は非統計誤差であるだけに始末に困るのである。

このため筆者らは「ふまじめな回答による誤差の大きさ」を数値化するため、実験計画法を応用したアンケート調査法を新しく開発した [4].

表1は「JR駅選択意識調査」で採用した要因と水準を示したものである。これらの要因と水準を  $L_{18}(2^1 \times 3^2)$  直交表へ割りつけ、18種類の質問文を作成した。1質問文に対して100人程度の被験者を割り当て、JR・地下鉄・バス・自家用車の選択率を調べた。

要因と水準の組合せによりJRの選択率は当然変動する。しかしこの変動の中には回答誤差による変動も含まれている。したがって分散分析法を用いてこれらの変動を分離するのである。

JR駅選択意識調査によって得られたデータから表2に示す分散分析表を作成する。この表で注目すべき点は残差項  $e$  の寄与率である。この寄与率は採用した要因以外の変動割合、つまり回答誤差や取り上げなかった要因による変動の大きさを示している。直交表を用いてアンケート文を作成する長所をまとめると次のようになる。

- ① 要因間に直交性のある意識データを作成することができる。交通機関選択モデルの多くは線形構造になっており、データが直交性を有している意味は重要である。
- ② 直交表を用いることにより、必要な情報を最小限の調査票種で求めることができる。
- ③ 寄与率を計算することにより、採用した要因の影響度を知ることができる。また残差項の寄与率があまりに大きければ、意識調査をやり直すことになる。

ところで森川氏は直交表を用いてアンケート文を作成することに対して、次のように批判している。

「統計学的効率性のみを考慮し、実験計画法理論に厳密にしたがうあまり、各属性値が代替案間で全く共線性を持たない、つまり直交するように定めると、多くの場合現実離れした代替案が作られ、被験者に対して現実性を失い、かえってデータの信頼性を失うことがある」

森川の指摘どおり、直交表にしたがうと現実離れした代替案が作成されることもある。しかし被験者の回答誤差、特にデタラメに回答しているか否かを検証するには、このようなアンケート文があえて必要になるのである。誰れが考えても利用するとは思われない条件に対して、誰れもが選択しないということが重要であり、被験者の回答誤差がこれによって明らかになるのである。

## (2) ロジットモデルの誘導

交通機関選択モデルはロジットモデルや重回帰モデル

表1 要因と水準

	要因の説明	水準1	水準2	水準3
M	交通目的	通勤	買物私用	
A	自宅から地下鉄駅までの距離	400m	800m	1,600m
B	自宅から乗継バス停までの距離	80m	250m	400m
C	自宅からJR駅までの距離	400m	800m	1,200m
D	JR札幌駅から目的地までの距離	400m	800m	1,200m
E	地下鉄大通駅から目的地までの距離	400m	800m	1,200m

表2 分散分析表

要因	偏差平方和	自由度	分散	F-値	寄与率
M	27144.40	1	27144.40	3.07	2.19
A	136982.00	2	68491.00	15.51*	14.28
B	9984.75	2	4992.38	1.13	0.00
C	460078.00	2	230039.00	52.09*	52.96
D	42958.00	2	21479.00	4.86	3.03
E	122081.00	2	61040.70	13.82*	12.50
$e$	35326.10	4	8831.53		15.04
$T$	835382.00	18			100.00

ル、数量化理論モデルをベースとし、意識データや行動データによってパラメータを推計し、構築する。特に式(1)に示すロジットモデル(Logit Model)は次に示すような優れた機能を有している。

$$P_i = \frac{\text{Exp}(a_0 + \sum_{j=1}^n a_j X_{ij})}{\sum_{i=1}^m \text{Exp}(a_0 + \sum_{j=1}^n a_j X_{ij})} \quad (1)$$

ここで、 $P_i$  :  $i$  交通機関の選択率 ( $i=1, \dots, m$ )

$X_{ij}$  : 交通機関の選択要因

$j$  : 要因数 ( $j=1, \dots, n$ )

$a_0, a_1, \dots, a_n$  : パラメータ

[ロジットモデルの特徴]

- ① 選択率  $P_j$  が必ず  $[0, 1]$  に入る。
- ② 式(1)を変形することにより、 $a_0, a_1, \dots, a_n$  のパラメータを容易に推計することができる。
- ③ データの内挿が可能であり、選択モデルとしての操作性が優れている。

非集計行動モデルは効用理論からロジットモデルを誘導している [1]。これに対して実験計画モデルでは情報理論にもとづいてロジットモデルを誘導するものである。

今、ある交通機関を選択するか、否かというバイナリ-の [0, 1] データが得られたとする。ここでサンプルサイズを  $n$ , [1] の出現確率を  $H$  としたとき、エントロピー  $H$  は式(2)で与えられる。

$$H = -n\{\ln P + (1-P)\ln(1-P)\} \quad (2)$$

しかしこのエントロピー  $H$  は、確率分布形が不明な場合には計算することができない。またわずかの観測値から分布形を仮定することも適当ではない。そこで田口玄一はエントロピーと同様の性質を有する二項分散  $\sigma^2 = P(1-P)$  に注目し、その利用を提唱している [5]。

二項分散の全分散  $S_T = nP(1-P)$  はノルムの 2 乗であるから、Parseval の直交分解が成立する。

$$S_T = S_S + S_N \quad (3)$$

ただし、 $S_S$ : Signal の分散

$S_N$ : Noise の分散

さらに  $S_S$  は各選択要因の成分に分解でき、 $S_N$  との比較によって分散分析を行なうことができる。実験計画モデルにおいて直交表を用いてアンケート文を作成し、分散分析表を求めるのはこのためである。

ところでロジットモデルは、「交通機関の選択はエントロピーを最大化するように決定される」という仮定のもとで、次のように誘導される。

$$H = -\sum_{i=1}^m P_i \ln P_i \rightarrow \text{Max} \quad (4)$$

式(4)を式(5)のように変形する。

$$-H = \sum_{i=1}^m P_i \ln P_i \rightarrow \text{Min} \quad (5)$$

これを次の 3 条件のもとで解く。

$$\sum_{i=1}^m P_i = 1 \quad (6)$$

$$P_i = \delta_i \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n P_i X_{ij} = \sum_{j=1}^n \delta_j X_{ij} \quad (8)$$

ここで、 $P_i$ : 交通機関  $i$  の選択率

$i$ : 交通機関の種類 ( $i=1, \dots, m$ )

$j$ : 選択要因 ( $j=1, \dots, n$ )

$\delta_i$ : 実現確率

$X_{ij}$ :  $i$  交通機関の  $j$  選択要因

ここで Lagrange の未定係数法を用いるため、関数  $\Phi$  を次のように定義する。

$$\Phi = \sum_{i=1}^m P_i \ln P_i - \theta \left( \sum_{i=1}^m P_i - 1 \right) - a_0 (P_i - \delta_i) - a_j \left( \sum_{j=1}^n P_j X_{ij} - \sum_{j=1}^n \delta_j X_{ij} \right) \quad (9)$$

ただし、 $\theta, a_0, a_j$ : 未定係数

式(9)を  $P_i, \theta, a_0, a_j$  で偏微分すると

$$\partial \Phi / \partial P_i = 0 \text{ より, } 1 + \ln P_i - \theta - a_0 - \sum_{j=1}^n a_j X_{ij} = 0 \quad (10)$$

となる。式(10)をさらに変形すると

$$P_i = \text{Exp}(\theta - 1) \cdot \text{Exp}(a_0 + \sum_{j=1}^n a_j X_{ij}) = 0 \quad (11)$$

すべての交通機関について考えると、 $\sum_{i=1}^m P_i = 1$  より、

$$\sum_{i=1}^m P = \text{Exp}(\theta - 1) \cdot \sum_{i=1}^m \text{Exp}(a_0 + \sum_{j=1}^n a_j X_{ij}) = 1 \quad (12)$$

式(12)を式(11)へ代入すると、ロジットモデルの一般形が得られる。

$$P_i = \frac{\text{Exp}(a_0 + \sum_{j=1}^n a_j X_{ij})}{\sum_{i=1}^m \text{Exp}(a_0 + \sum_{j=1}^n a_j X_{ij})} \quad (13)$$

ロジットモデルは効用理論からも誘導できるが、理論的前提を吟味すると情報理論からのアプローチの方が妥当性が高いように思われる。なぜならば効用理論にもとづく場合、誤差変動がワイブル分布すると仮定した時のみにロジットモデルになるからである。もし誤差変動が正規分布にしたがうとしたならば、誘導されるモデルはプロビットモデルになる。

これに対して情報理論からのアプローチは、「エントロピーを最大化する」という仮説を用いている。この行動仮説はマクロ的には公理とみなされており、交通機関の選択行動においても成立すると考えられるからである。

### 3. 実験計画モデルの予測精度

アンケート調査時には真剣に考えて「利用する」と回答しても、実際の行動では「利用しない」ことは珍しくない。意識データが交通計画情報として積極的に利用されなかった理由の 1 つに、この回答誤差の問題がある。

意識と行動にどれだけのギャップがあるかは、事前事後調査を実施することによって一目瞭然となる。実験計画モデルでは、常に実現可能な交通サービスを要因と水準に採用している。したがって対象とする交通システムが完成した暁には、予測値と実際値との照合を直ちに行なうことができる。

式(14)は表 2 の分散分析表で有意になった要因を用いて構築した JR 駅選択モデルである。

$$P_{JR} = \frac{1}{1 + \text{Exp}\{-(-1.115 + 0.378X_1 + 1.039X_2 - 1.795X_4 - 0.796X_5 + 1.096X_6)\}} \quad (14)$$

この式を用いて 1985 年 12 月に、JR 新駅の利用者数(通勤通学交通)を予測したところ 735 人/日となった。

1986 年 11 月に JR 函館本線発寒中央駅が新設された。開業のインパクトも収まった 1987 年 4 月に、実際の利用

表 3 実験計画モデルの構築例と事前・事後分析結果

調査名	目的	推定モデル	事前・事後分析			要因と水準	
			予測値				
新千歳空港陸上運輸施設整備事業推進調査	新交通システムの選択率を予測する	直交多項式(重回帰式)	予測値	35.2%	昭和51年12月調査	料 金:900円 乗 車 時 間:40分 待 ち 時 間:30分	
			実績値	38.9%	昭和56年11月調査		
旭川バス輸送網整備計画調査	新設バス路線の利用客数を予測する	オメガモデル	予測値	403人	昭和55年10月調査	交通目的:通勤 バスの運行間隔: 3~4回/時 バス停までの徒歩距離: 200, 400, 600m	
			実績値	423人	昭和56年3月調査		
千歳空港アクセス調査業務	千歳空港におけるアクセス交通機関の分担率を予測する	集計ロジットモデル	予測値	鉄道	41.3%	昭和56年11月調査	鉄道の乗車時間:40分 鉄道の料金:900円 鉄道の待ち時間:30分 季節:冬期 方向:上り 地下鉄との乗継バス:無
				バス	40.6%		
			その他	18.1%	昭和56年11月調査		
			実績値	鉄道		40.3%	
バス	39.3%						
その他	20.4%						
都市内公共輸送機関乗継システム策定調査	地下鉄の延長に伴う乗継バスシステムの選択率を予測する	集計ロジットモデル	予測値	50.7%	昭和55年7月調査	交通目的:通勤 乗継バス乗車時間:10分 乗継料金:230円 直行バス運行間隔:14分 乗継バス運行間隔:7分	
			実績値	51.6%	昭和57年12月調査		

者数を調査した結果、1日の平均利用者数は661人であった。意識モデルの予測値と実際値の差は約10%であり、予測精度は十分に満足できるものであった。

表3は筆者らがこれまで構築してきた実験計画モデルの事前事後調査結果を示したものである。いずれの事例においても予測精度は良く、実験計画モデルが交通機関選択モデルとして優れていることを裏づけている。

#### 4. 実験計画モデルの今後の課題

実験計画モデルは意識データを用いているため、母集団と標本集団の関係を明示できない。したがって構築されたモデルの一般性や地域移転性については、さらに研究を進める必要がある。筆者らのこれまでの経験によると、実験計画モデルは都市圏全体のモデルとして用いる方が良い結果を得ている。

ところで効用理論の妥当性を論じるとき、プロミネンス仮説が問題になる。つまり、利用者はある特定の要因のみに注目して、他の要因の水準が悪くなってもそれを無視するというものである。効用最大化原理からすると、プロミネンス仮説で選択行動を行なう人々は、許せない存在になる。

しかし実験計画モデルでは要因間の直交性が保たれて

おり、たとえプロミネンス仮説のように人々が選択行動を行なったとしても、モデル全体の信頼性が損なわれることがない。筆者らは、学生はお金のみを、ビジネスマンは時間の短いことのみを考慮して交通機関を選択している事例から、プロミネンス仮説的な行動こそ、実際的ではないかと想定している。

実験計画モデルはプロミネンス仮説による行動を表現できる数理モデルであり、その理論構成を鋭意研究中有る。

#### 参 考 文 献

- 1) 土木学会：非集計行動モデルの理論と実際，土木計画学講習会テキスト，1985年10月
- 2) 田村 亨，佐藤馨一，五十嵐日出夫：意識調査データによるモーダルスプリットの構築に関する研究，地域学研究第12巻，1980年5月
- 3) 森川高行：交通需要予測モデルのステイティッド・プリファレンス・データ適用に関する一考察，土木計画学研究講演集，1989年12月
- 4) 佐藤馨一，五十嵐日出夫：空港アクセス交通における交通機関分担モデルの推定，土木学会論文報告集，第274号，1978年6月
- 5) 田口玄一：実験計画法(第3版)，1976年12月，丸善