

# パネルデータを用いた連続時間を考慮した個人の離散選択行動の動的モデル化\*

*A Dynamic Modeling of an Individual's Discrete Choice Behavior on Continuous Time Frame Using Panel Data\**

藤井 聡\*\* 米田 和也\*\*\* 北村 隆一\*\*\*\* 山本 俊行\*\*\*\*\*

By Satoshi FUJII, Kazuya YONEDA, Ryuich, KITAMURA and, Toshiyuki Yamamoto

## 1. はじめに

近年、交通現象の動的側面を解析することが重要視されるに伴い、個人の交通行動を記述する方法論としてもパネル分析アプローチが注目されている。同一個体の複数時点での状態を観測することで得られるパネルデータには、各個体の状態変化についての情報が含まれており、したがって、パネルデータを用いた分析、すなわち、パネル分析によって交通行動の動的側面を考慮した解析、ならびに、将来予測が可能となると考えられる<sup>1)</sup>。

既往のパネル分析アプローチに基づいた研究では、複数の調査時点での観測値の関係を記述することを目的としたものが一般的であった。このアプローチに基づいて、動的分析や個人固有誤差の除去を行うことで、よりの確な需要予測モデルの構築を試みてきた。現時点では、そうした研究努力の積み重ねによって、一時点での観測値であるクロスセクショナルデータに基づく需要予測モデルよりも、より高い精度の需要予測モデルが構築されつつあるものと考えられる<sup>2), 3), 4), 5)</sup>。

しかし、当然ながら、実際の個人の交通行動における状態変化は、その調査時点では起きるのではなく、調査時点と調査時点の間に起きるものである。それに加え、個人の交通行動は時間と共に変化していること、そして、時間の流れが連続的であることを考えれば、個人の交通行動における状態の変化を連続時間軸上で考えることが望ましいであろう。そこで本研究では、佐佐木<sup>6)</sup>、Kitamura<sup>7)</sup>が交通解析に用いたセミマルコフモデル<sup>8)</sup>を適用することで、個人の交通行動における離散状態の連続時間軸上での遷移過程を再現する行動モデルの構築を図る。そして、このモデルを用いて、Puget Sound Panel<sup>9)</sup>調査で観測された個人の通勤手段の遷移過程に分析を加える。

## 2. セミマルコフモデルによる個人の遷移過程の再現

### (1) セミマルコフモデルの概要

ここでは、個人の連続時間軸上での遷移過程を再現するセミマルコフモデルについて述べる。

ある主体(個人) $n$ が離散状態空間  $E$  内を、連続時間軸上で遷移していく場合を考える。微小時間内ではこの個人の遷移は複数回生じることではなく、かつ、遷移過程の基礎的な確率構造が時間的に同質である場合、その遷移過程はセミマルコフ過程と定義される<sup>8)</sup>。

セミマルコフ過程において、個人  $n$  が状態  $i$  へ遷移した時刻から時間  $t$  が経過するまでに次の遷移で状態  $j(i \neq j)$  となる確率を  $Q^n(i, j, t)$  と定義すると、状態  $i$  から次の遷移で状態  $j$  となる確率  $P^n(i, j)$  は、

$$P^n(i, j) = \lim_{t \rightarrow \infty} Q^n(i, j, t) \quad i \neq j \quad (1)$$

である。また状態  $i$  から状態  $j$  へ遷移するという条件の下で、個人  $n$  が状態  $i$  に滞留する時間の分布関数  $G_{ij}^n(t)$  は、

$$G_{ij}^n(t) = Q^n(i, j, t) / P^n(i, j) \quad (2)$$

である。ここで、この分布関数には、

$$G_{ij}^n(t) = G_{ik}^n(t) \quad \forall i, j, k \in E, j \neq i, k \neq i \quad (3)$$

が成立し、かつ、その滞留時間が指数分布に従うと仮定すると、式(2)より、

$$Q^n(i, j, t) = P^n(i, j) \left( 1 - e^{-\lambda_{ij}^n t} \right) \quad t \geq 0, \forall i, j \in E, i \neq j \quad (4)$$

$\lambda_{ij}^n$  : パラメータ ( $> 0$ )

が成立する。

そして、個人  $n$  のある時点での状態が  $i$  であるという条件の下で、その時点から時間  $t$  が経過した時点での状態が  $j$  である条件付き確率を  $P^n(i, j)$  と定義すると、 $P^n(i, j)$  は以下のように定式化される<sup>7)</sup>。

$$\begin{aligned} P^n(i, j) &= e^{-\lambda_{ii}^n \delta_{ij}} + \int_0^t \sum_k \frac{\partial Q^n(i, k, s)}{\partial s} P^n(i, s)(k, j) ds \\ &= e^{-\lambda_{ii}^n \delta_{ij}} + \int_0^t \lambda_{ik}^n e^{-\lambda_{ii}^n s} \sum_k P^n(i, k) P^n(i, s)(k, j) ds \end{aligned} \quad (5)$$

$\delta_{ij} : i=j$  の場合 1,  $i \neq j$  の場合 0 のダミー変数

この式の右辺第1項は、時間  $t$  の間に全く遷移が生じない確率を表し、右辺第2項は時間  $s(0 < s < t)$  が経過した時点で状態  $i$  から状態  $k$  に遷移し、残りの時間  $t-s$  の間で状

\* キーワード: パネル調査, 交通行動分析, 手段選択

\*\* 正員, 工修, 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻

\*\*\* 正員, 住宅都市整備公団

\*\*\*\* 正員, Ph.D, 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻

\*\*\*\*\* 正員, 工修, 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻

(〒606 京都市左京区吉田本町, Tel 075-753-5136, Fax 075-753-5916)

態  $k ( \neq i )$  からいくつかの遷移を繰り返し最終的に状態  $j$  となる確率を表している。

ここで、 $t = 0$  の場合の式(5)で表される  $P^n(i, j)$  の  $t$  の一階微分関数を  $A^n(i, j)$  と定義すると、

$$A^n(i, j) = \begin{cases} -\lambda_i^n & \text{if } (i = j) \\ \lambda_i^n P^n(i, j) & \text{if } (i \neq j) \end{cases} \quad (6)$$

この  $A^n(i, j)$  を用いると、 $P^n(i, j)$  は以下になる<sup>7)</sup>。

$$P^n_t = e^{tA^n} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{t^m}{m!} (A^n)^m \quad (7)$$

$P^n_t : P^n_t(i, j)$  を要素とする行列

$A^n : A^n(i, j)$  を要素とする行列

個人の遷移過程を以上の様に定式化した場合、ある時点における個人の状態空間  $E$  内の離散状態が観測され、かつ、行列  $A^n$  が定義されていれば、式(7)を用いて、その観測時点以降の任意の時点における個人の状態確率を算定することができる。すなわち、セミマルコフモデルでは、個人の時間軸上での状態変化を連続的に予測することが可能なのである。

## (2) 個人間の差異を考慮した行列 $A^n$ の定式化

上述の様に、セミマルコフモデルを用いて個人の状態遷移過程を動的に予測するためには、行列  $A^n$  を定義する必要がある。本研究では、個人間の差異を考慮した上で行列  $A^n$  を定義するために、 $P^n_t(i, j)$  をロジットモデルの枠組みで、そして、 $\lambda_i^n$  を外生変数の関数として定式化する。

$P^n_t(i, j)$  を定式化するにあたり、以下の効用関数を定義する。

$$U^n_{ij} = V^n_{ij} + \varepsilon^n_{ij} \\ = B_{ij} X^n_{ij} + \varepsilon^n_{ij} \quad \forall i, j \in E, i \neq j \quad (8)$$

$U^n_{ij}$  : 個人  $n$  が状態  $i$  から遷移する場合の状態  $j$  の効用

$V^n_{ij}$  : 確定効用

$\varepsilon^n_{ij}$  : 独立で同一なガンベル分布に従う誤差項

$B_{ij}$  : パラメータベクトル

$X^n_{ij}$  : 説明変数ベクトル

このように効用関数を定式化すると、 $P^n_t(i, j)$  は、

$$P^n(i, j) = \frac{\exp(B_{ij} X^n_{ij})}{\sum_{k \neq i} \exp(B_{ik} X^n_{ik})} \quad (9)$$

となる。一方、状態  $i$  における滞留時間についてのパラメータ  $\lambda_i^n$  については、その非負条件を考慮して、

$$\lambda_i^n = \exp(H_i Z^n_i) \quad (10)$$

$H_i$  : パラメータベクトル

$Z^n_i$  : 説明変数ベクトル

と定式化することとした。

以上より、パラメータベクトル  $B_{ij}$ 、 $H_i$  が既知であり、かつ、ある時点における個人  $n$  の状態空間  $E$  内の離散状態、ならびに、説明変数ベクトル  $X^n_{ij}$ 、 $Z^n_i$  が観測されていれば、その観測時点以降の任意の時点における個人の状態確率を式(7)を用いて算定することができる。

## (3) 未知パラメータ $B_{ij}$ 、 $H_i$ の推定方法

パラメータ  $B_{ij}$ 、 $H_i$  については、パネル調査によって、各調査時点での各個人の状態空間  $E$  内の離散状態、ならびに、各説明変数を測定し、以下の式(11)、ならびに、式(5)、(6)、(7)、(9)、(10)で定式化される対数尤度関数  $LL$  を最大化することで推定する。

$$LL = \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^{L_n-1} \ln \{ P^n_{D_{l,l+1}}(S^n_l, S^n_{l+1}) \} \quad (11)$$

$N$  : パネル調査におけるサンプル数

$L$  : パネル調査での個人  $n$  の調査参加回数

$S^n_l$  : パネル調査で観測された個人  $n$  の第  $l$  調査での状態 ( $\in E$ )

$D_{l,l+1}$  : 第  $l$  調査と第  $l+1$  調査との調査間隔

## 3. パネルデータの概要

本研究では、前節で述べたモデルを用いて、Puget Sound Panel で観測された通勤者の通勤交通機関選択行動を動的に解析する。ここでは、このパネル調査について述べる。

表-1 パネル調査での通勤手段カテゴリー

|                    |               |
|--------------------|---------------|
| SOV                | 自動車(乗車人数1名)   |
| Carpool            | 自動車(乗車人数2名以上) |
| Transit            | バス            |
| Walk               | 徒歩            |
| Car/bus combinatio | 自動車とバスの双方利用   |
| Ferry              | フェリー          |
| Other              | その他           |
| Missing            | 不明            |

Puget Sound Panel 調査<sup>9)</sup>は、アメリカ合衆国のシアトルで1989年、1990年、1992年、1993年、1994年の5時点で実施されたパネル調査であり、個人の交通環境や態度の変化とそれに伴う交通行動の変化を追跡することを主な目的として実施された。第一回調査(以下、Wave 1)では、電話を用いて地域別に無作為に1713世帯を抽出した。また、Wave 2以降では、脱落サンプルを補充することを目的として、Wave 1での初期サンプルと同様の方法を用いてサンプル更新が行われた。また、主な調査項目は、アクティビティダイアリー、世帯・個人属性、ならびに、通勤通学手段である。なお、パ

表-2 推定結果

|                                             | パラメータ | t値     |
|---------------------------------------------|-------|--------|
| SOVのλについて ( $H_{SOV}$ )                     |       |        |
| 定数項                                         | -2.15 | -22.43 |
| Transitのλについて ( $H_{transit}$ )             |       |        |
| 性別ダミー (女性なら1, 男性なら0)                        | 0.64  | 3.18   |
| 定数項                                         | -2.04 | -19.48 |
| Carpoolのλについて ( $H_{carpool}$ )             |       |        |
| 定数項                                         | -0.35 | -3.14  |
| SOVからTransitへの遷移について ( $B_{SOV, Transit}$ ) |       |        |
| 通勤距離(mile)                                  | 0.36  | 5.21   |
| 性別ダミー (女性なら1, 男性なら0)                        | -0.91 | -1.51  |
| 年齢                                          | 0.03  | 3.18   |
| 世帯自動車保有台数                                   | -2.24 | -10.70 |
| SOVの通勤速度 (mile/min)                         | -3.69 | -7.03  |
| 定数項                                         | 0.23  | 0.53   |
| TransitからSOVへの遷移について ( $B_{transit, SOV}$ ) |       |        |
| 世帯自動車保有台数                                   | 1.03  | 4.22   |
| 世帯人数                                        | -1.39 | -5.62  |
| Transitの通勤速度 (mile/min)                     | 3.75  | 4.69   |
| Carpoolの通勤速度 (mile/min)                     | -8.60 | -4.97  |
| 定数項                                         | 4.13  | 8.90   |
| CarpoolからSOVへの遷移について ( $B_{carpool, SOV}$ ) |       |        |
| 通勤距離(mile)                                  | -0.62 | -5.85  |
| 性別ダミー (女性なら1, 男性なら0)                        | -1.91 | -2.66  |
| 年齢                                          | 0.22  | 16.93  |
| Carpoolの通勤速度 (mile/min)                     | 11.16 | 11.76  |
| 定数項                                         | -2.90 | -4.12  |

[注意] 表中では、 $H_{ij}$ ,  $B_{ij}$ における引数  $i, j$  に, Transit, SOV, Carpool の文字列を挿入して表記した。

Sample Size = 897

$L(C) = -451.04$ ,  $L(B) = -428.57$ ,  $c^2(df = 14) = 44.93$

ネル調査では、通勤通学手段は表-1 の 7 つのカテゴリに分類されている。

#### 4. 数値計算例

一般に、3. で述べた様なパネル調査によって何らかの遷移過程を観測した場合、その遷移過程を完全に観測することはできず、複数の離散時点での状態の観測が可能であるに過ぎない。本研究では、本稿 2. で述べた枠組みで、離散時点で観測されたパネルデータから、連続時間軸上での遷移過程記述する動的な行動モデルの構築を図る。モデル構築にあたっては、本稿 3. で述べたパネル調査によって観測された通勤者の通勤手段選択行動の連続時間軸上での遷移過程をモデル化の対象とした。ここでは、パネルデータを用いた未知パラメータ  $B_{ij}$ ,  $H_{ij}$  の推定結果を示す。

個人の時間軸上での通勤手段選択行動の遷移過程をモデル化するにあたり、離散状態空間  $E$  に含まれる離散状態を、表-1 に示した SOV, Transit, Carpool の 3 つとした。これは、この 3 つ以外の、Walk, Car/bus, Ferry, Other, Missing に反応しているサンプルは少なく(これらを全て足しあわせてもいずれの Wave においても 10% にも満たなかった)、かつ、反応サンプル数が少ない離散状態を状態空間に含めた上でパラメータ推定を行うことは困難であるためである。

そして、いずれの Wave においてもこれら 3 つの通勤手段のみを使用していた被験者 279 名が報告した、897 の隣接 2Wave 間での通勤手段選択行動の遷移(ある Wave での通勤手段とその次の Wave での通勤手段のペア)をサンプルとして、式(11)に基づいて尤度関数を誘導した。

また、SOV から Carpool, Transit から Carpool, Carpool から Transit へのそれぞれの遷移についての確定効用  $V^a_{ij}$  をいずれも 0 に固定し、SOV から Carpool, Transit から Carpool, Carpool から Transit への確定効用を外生変数とパラメータの線形結合で定式化した。

以上の前提に基づいて推定した結果を表-2 に示す。まず、各々の通勤手段での滞在時間についてのパラメータ推定値に着目する。各々の定数項を比較すると、Carpool が他の通勤手段よりも大きい値となっている。この結果は、式(10)の定式化、ならびに、指数分布の性質より、Carpool での滞在時間が、他の通勤手段に比較して短いことを意味しており、実際、得られたパラメータ推定値から各々の通勤手段での滞在時間の期待値を算定すると、Carpool が 1.42 年である一方で、Transit が 5.73 年<sup>[1]</sup>、SOV が 8.58 年であった。すなわち、通勤者の通勤手段が Carpool であるという状態は、他の通勤手段である状態に比べて不安定であり、他の状態に移りやすいものであるものと考えられる。また、Transit については女性の方が滞在時間が短くなる傾向にあることが示された。

次に、遷移確率について仮定した、ある状態から別の状態に遷移する場合の確定効用についてのパラメータ推定値に着目する。通勤距離が長くなるほど、SOV から遷移する場合も Carpool から遷移する場合も Transit を選択する確率が高くなることが示されている。また、世帯の自動車保有台数が多い通勤者は、SOV から遷移する場合には Transit ではなく Carpool を、Transit から遷移する場合には Carpool ではなく SOV を選択する傾向が、それぞれ強いことが示されている。また、各々の選択肢の速度が、通勤手段の選択確率に影響を及ぼしていることが示されているが、特に、Carpool と SOV の二つを選択肢とする Transit からの遷移については、Carpool の速度が低下すると SOV を選択する確率が高くなることが分かる。このことから、Carpool の専用レーンを設けるなどの政策を実施することで、Carpool のシェアの拡大が図れるものと考えられる。

ここで、以上で推定したパラメータ推定値、ならびに、推定計算に用いたサンプルを用いて、通勤手段のサンプル内のシェアの時間に伴った変化について分析した結果を示す。

推定計算に用いた 279 名のそれぞれの個人について、Wave5 における通勤手段を与件として与えた場合の、Wave5 の実施時点からの経過時間別の SOV, Transit, Carpool のそれぞれを利用している確率を、式(7)および式(8)~(10)に基づいて算定した。ただし、説明変数ベクトル  $X^a_{ij}$ ,  $Z^a_{ij}$  としては、Wave5 の実施時点におけるものを用いた。そして、以下

の式に基づいて Wave5 の実施時点からの経過時間別の通勤手段のサンプル内シェアを算定した。

$$S_{i,t} = \sum_{n=1}^{279} P_{i,t}^n \quad (12)$$

$S_{i,t}$ : Wave5 から時間  $t$  が経過した時点での、通勤手段  $i$  のサンプル内シェア

$P_{i,t}^n$ : Wave5 から時間  $t$  が経過した時点で、個人  $n$  が通勤手段  $i$  を利用している確率(式(7)~(10)より算定)

この方法を用いて算定した、Wave5 実施時点から 10 年が経過するまでの各通勤手段のシェアの時間推移を図-1 に示した。図-1 から、時間の経過に伴って、SOV のサンプル内のシェアが増加する一方で、Transit は減少していくことが分かる。ただし、時間の経過に伴ってシェアの変化率は徐々に低下していき、10 年が経過した時点では、サンプル内のシェアはほとんど変化していないことが分かる。すなわち、この結果は、Wave5 の実施時点では、未だサンプル内の通勤手段のシェアは均衡状態を迎えておらず、均衡状態となるまでおよそ 10 年かかることを示している。ただし、Carpool については、時間が経過してもほとんど変化しないことが分かる。なお、この数値計算では、いずれの時点においても外生変数として Wave 5 時点のものを用いており、交通環境が変化した場合には、今回の数値計算とは異なった均衡状態に向かうこととなるものと考えられる。

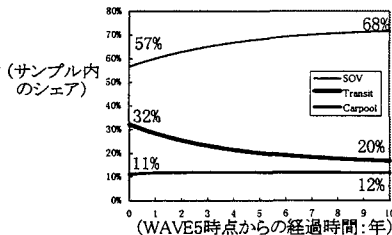


図-1 セミマルコフモデルを用いたサンプルシェアの時間変化予測

## 5. おわりに

本研究では、セミマルコフモデルを適用することで、個人の通勤手段の連続時間軸上での遷移過程を再現する行動モデルを構築した。そして、この連続時間軸を考慮したモデルの未知パラメータを、複数の離散断面で実施されたパネル調査で得られたデータに基づいて推定した。推定計算の結果、通勤者が通勤手段として Carpool を連続して利用し続ける期間は短い、すなわち、Carpool を通勤手段として利用するという状態は他の交通機関を利用するという状態に比べて不安定であることが分かった。また、機関別の移動速度が利用手段に影響を及ぼしていることも示された。

構築したモデルを、推定サンプルに適用した分析からは、Puget Sound Panel における Wave5 の調査時点における通勤手段シェアは、均衡状態を迎えておらず、今後 10 年程度は

Transit のシェアが低下し、SOV のシェアが増加していく傾向にあることが示された。ただし、Carpool のシェアは、時間が経過してもほとんど変化しないことも示された。なお、通勤者が通勤手段として Carpool を連続して利用し続ける期間は Transit や SOV よりも短いことを考え合わせると、Carpool は、ほぼ一定の水準のシェアを保ちつつも、利用者が激しく入れ替わっていくものと考えられる。

この様に、本モデルを適用することで、交通現象の動的な解析を行うことが可能であり、この点が本モデルの大きな特徴であるといえる。特に、通勤手段のシェアの誘導を政策的に考える場合、本モデルの枠組みでは、その交通手段を選択する場合の効用に影響を及ぼす外生変数を操作するだけでなく、その交通手段における滞留時間に影響を及ぼす外生変数を操作するという方法を検討することが可能である。ただし、本稿で示した推定計算では、滞留時間に影響を及ぼす有意な変数がほとんど推定できなかった。今後、今回推定計算に用いた機関別の移動速度以外の交通サービスレベルを表す変数を考慮する等、より適切なデータを整備することで、推定計算を再び行うことが必要であるものと考えられる。また、外生変数の時間変動を連続的に考慮することも今後の重要な課題であると考えている。

最後に、本研究の遂行にあたり、文部省科学研究費基盤(B)(1)の助成を受けた。ここに記して、謝意を表します。

## 注

[1] Transit の滞在時間については、定数項以外に性別ダミーも推定されている。これは、男性にとつての定数項と女性にとつての定数項が推定されていると解釈できる。したがって、男性の Transit の滞在時間の期待値は 7.71 年、女性の滞在時間の期待値は 4.08 と別々に算定される。本文に示した 5.73 年というのは、サンプルの性別構成比率を考慮した、Transit の滞在時間のサンプル平均である。

## 参考文献

- 北村隆一、飯田恭敬、杉恵頼幸、石田東生、他：交通計画におけるパネル調査の方法論およびパネルデータ解析手法に関する研究、土木計画学研究・講演集 No. 19, pp. 617-624, 1996.
- 杉恵頼幸・羽藤英二・藤原章正：パネルデータを用いた交通機関選択意識のダイナミック分析、土木計画学研究・論文集、No. 10, pp. 31-38, 1992.
- 内田敬・飯田恭敬、交通行動パネル調査の方法論的検討、土木計画学研究・論文集、No. 11, pp. 319-326, 1993.
- 河上省吾・三島康生：通勤・通学交通手段選択行動における動的特性の分析、土木学会論文集、No. 470, /IV-20, pp. 57-66, 1993.
- 西井和夫・近藤勝直・古屋秀樹 他：パネルアトリションを考慮した買物場所選択モデル—甲府買物パネルデータを用いて、土木計画学研究・論文集、No. 12, pp. 389-396, 1995.
- 佐佐木綱、松井寛：会場内の観客流動モデル、土木学会論文集、第 159 号, pp.90-95, 1968.
- Kitamura, R.: Panel Surveys of Travel Behavior : Issues and Prospects, PART I: Effectiveness of Panels in Detecting Changes, Prepared for 4<sup>th</sup> International Conference on Survey Methods in Transport, Oxford, 1996.
- 森村英典、高橋幸雄：マルコフ解析, pp103-107, 日科技連出版社, 1979.
- Murakami, E. and Watterson W.T: Developing a Household Travel Panel survey for the Puget Sound Region, Transportation Research Record 1285, pp. 40- 46, 1991.