

# パネルデータを用いた連続時間軸上の個人の離散選択行動の動的モデル化： 均衡状態を仮定しない動的な需要変動解析に向けて\*

*Dynamic Modeling of an Individual's Discrete Choice Behavior on Continuous Time Frame Using Panel Data:  
Toward Dynamic Demand Analysis without the Assumption of Equilibrium\**

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

By Satoshi FUJII, Kazuya YONEDA, Ryuichi, KITAMURA, and Toshiyuki YAMAMOTO

## 1. はじめに

### (1) 動的な交通需要解析の必要性

言うまでもなく、交通計画が対象とする様々な現象は動的な側面を持つものである。道路網上の交通状態だけでなく、公共交通ネットワーク上の旅客需要も時々刻々と変動するとともに、日々においても変化する。そして、個人個人の交通行動も時間と共に変化する。的確な交通需要予測を行うためには、対象とする交通現象の動的な側面は無視できないものである。特に、何らかの交通政策を実施した場合に、どのような時間遅れを伴ってその影響が生じるのか、という問題は、その時間遅れが大きなものであればあるほど政策評価の際に大きな問題となる。

一方、需要解析を行う場合、解析対象としているシステムにおいて均衡状態が成立しているという仮定は頻繁に用いられる。床の上を転がるボールがいつかは静止するように、赤く熱せられた鉄がいつかは冷えるように、恐らくはいかなるシステムも、十分に長い期間、システム外部からの干渉を受けない場合には、均衡状態にたどり着くものと推測される。ここで「均衡」という概念を厳密に定義するためには非常に慎重な態度が要請されるものと考えられるが、少なくとも「複数の要素が組織化・構造化されることで成立するシステムの状態を表す状態変数の中で、時間の経過に伴って変化可能なものの少なくとも一部が、時間軸上である定数に収斂する」という条件は、そのシステムが均衡状態に達している、ということの必要条件であると言える。したがって、着目する状態変数(例えば、道路網上で配分交通量や交通システムにおける機関分担

率など)が時間に対して不変であるような均衡状態が成立しているという仮定を一旦認めれば、時間軸を無視した数理解析、すなわち、時間軸を考慮した解析と比較すると格段に容易な数理解析で、極めて巨大なシステムであってもその全体を視野に入れることに成功するのである。それに加えて、いかなるシステムも十分に長い間に外的刺激を受けなければ均衡状態に達する(すなわち、上述の条件を満たす状態に達する)であろうという推測は、現実界のいかなるシステムも変化に対する何らかの摩擦を持つであろうという見込みに基づくものであるが、この見込みは熱力学を持ち出すまでもなく極めて自明であると言える。これらの点が、需要解析を含む様々なシステム解析において均衡成立の仮定が頻繁になされてきた根拠であろう。

しかし、「十分に長い期間、システム外部からの干渉を受けない」という仮定が成立するようなシステムが現実存在するかどうかについては、十分に注意する必要がある。恐らくは、現実の多くのシステムは、ある均衡状態に向かう途中でシステム外部から何らかの刺激を受け、それによって別の均衡状態に向かうようになり、そして、そこに辿りつく間に再び新たな刺激をシステム外部から受ける、ということを繰り返しながら時間軸上での状態変化を繰り返すものと推測される。そして、この傾向は、そのシステムの規模が大きくなるほど顕著になるものと考えられる。このように考えると、交通需要予測を行う場合に重要なものは、均衡状態ではなく、むしろ、交通需要の動的な挙動そのものであることが理解できる。交通需要予測、あるいは、現実の現象記述を目指す際に均衡状態が重要となるのは、均衡状態に到達するまでの軌跡を再現するために到達点としての均衡状態を想定する、という立場をとった場合においてのみであると言っても過言ではないであろう。

### (2) 個人の行動変化を記述する行動モデルの必要性

交通需要は個々人の交通行動の累積であり、交通需要

\* キーワード:動的システム解析, パネル調査, 交通行動分析  
\*\* 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)

の動的な変化は、個人の交通行動の動的な変化の累積であるといえることができる。したがって、個人の交通行動の動的変化を記述することができる行動モデルを開発し、それを集計化することで、交通需要の動的な変化の解析ができるものと期待される。このアプローチが、均衡状態を仮定する集計的アプローチよりも優れている点は、個人間の交通行動の異質性を考慮できる点や、個人の意思決定を考慮できる点などが挙げられる。しかし、政策評価ツールを開発するという点において最も重大な利点は、実証データに基づいてより信頼性の高い政策評価ツールを開発することができる、という点であろう。

システムの動的な挙動は膨大な数に上る外的刺激の影響を受けている。この膨大な数に上る外的刺激がシステムに及ぼす影響を実証的なモデルで記述することに成功してはじめて、信頼性の高い政策評価が可能となるものと期待される。システム全体を一括して分析する均衡解析の枠組みでは、それらの外的刺激を示す変数を全て観測し、その上で、統計学的手法等を援用してデータにモデルを適合させることが必要となる。しかし、外的刺激の数、すなわち、モデルが取り扱う変数の数が膨大なものとなることを考えれば、その作業が非常に困難を伴うものとなる。したがって均衡解析の枠組みでは、多様な外的刺激の大半を「システムの挙動に対しては本質的な影響を及ぼさない」という仮定のもとで切り捨てざるを得ないものと考えられる。しかし、この仮定の下での動的解析の信頼性は慎重に評価されるべきものであろう。

ところが、システムの構成要素、すなわち、個々の個人に焦点をあて、1) その行動に影響を及ぼす種々の要因を観測し、2) その要因と行動との間を繋ぐ因果関係を適切にモデル化し、3) 集計化する、といういわゆる非集計アプローチによれば、システムに対する種々の外的刺激がシステムの動的な挙動に及ぼす影響を適切に再現できるものと考えられる。なぜなら、個々の外的刺激は、直接的に抽象化されたシステム全体に働きかけるのではなく、システムの個々の構成要素、すなわち、交通システムにおいては具体的な個人々の行動に働きかけるものだからである。この様に考えると、従来よりデータ収集やモデル推定等についての研究蓄積が数多くなされている行動モデルによる現象解析アプローチによれば、種々の外的刺激を考慮した、信頼性の高いシステムの動的解析が期待できるものと考えられる。

### (3) 非集計パネル分析の問題点と本研究の目的

以上のような背景のもとで個人の交通行動の動的変化を記述することができる行動モデルの開発の必要性が高まるにつれて、個人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を用いたパネル分析アプローチが注目を集めるに至った<sup>1)</sup>。

一般に、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、よりの確かな需要予測モデルの構築が試みられてきた。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、必ずしもその調査時点で起きるのではなく、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、佐佐木他<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を構築する。このモデルを、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関するデータを用いて推定する。こうして構築されたモデルを用いて、推定サンプルを対象として通勤手段のシェアの変遷を分析し、システムの均衡に関する基礎的な考察を加える。

## 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 $I$ 個の離散状態から構成される離散的状態空間 $E$ 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  $n$  が離散的状態空間  $E$  の内のある状態  $i$  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  $j (j \neq i)$  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  $G^n_{ij}(t)$  は、

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

である。ここで、この分布関数には、

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

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、

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

$\lambda^n$ : 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  $P^n_t(i, j)$  と定義すると、 $P^n_t(i, j)$  は以下のように定式化される<sup>7)</sup>。

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

$\delta_{ij}$ :  $i=j$  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  $t - s$  の間で状態  $k (k \neq i)$  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  $P^n_t(i, j)$  の  $t$  の一

階微分関数を  $A^n(i, j)$  と定義すると、

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

この  $A^n(i, j)$  を用いると、 $P^n_t(i, j)$  は以下のようになる<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

ここで  $e^{tA^n}$  については、以下の方法で計算できる。

まず、行列  $A^n$  の  $i$  番目の固有ベクトルと固有値をそれぞれ  $f_{ni}$ ,  $\pi_{ni}$  とする。すなわち、

$$A^n f_{ni} = \pi_{ni} f_{ni} \quad (8)$$

ここで、

$$N_n = (f_{n1}, f_{n2}, \dots, f_{ni}, \dots, f_{nt}) \quad (9)$$

$$D_n = \begin{pmatrix} \lambda_1^n & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & \lambda_i^n & \\ & & & \ddots \\ 0 & & & & \lambda_t^n \end{pmatrix} \quad (10)$$

なる行列を定義すると、

$$(A^n)^k = N_n D_n^k N_n^{-1} \quad k=0, 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

この式(11)を用いると式(7)は、

$$P^n_t = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{t^m}{m!} (A^n)^m = N_n e^{tD_n} N_n^{-1} \quad (12)$$

ここに、

$$e^{tD_n} = \begin{pmatrix} e^{\pi_{n1}t} & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & e^{\pi_{ni}t} & \\ & & & \ddots \\ 0 & & & & e^{\pi_{nt}t} \end{pmatrix} \quad (13)$$

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、その固有値と固有ベクトルを用いて、式(12)より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。このことは、セミマルコフモデルが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であることを意味している。この点が、セミマルコフモデルが動的な需要解析、動的な交通需要予測を行う際に非常に有効な方法論であることの本質的根拠である。

## (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、 $P^n(i, j)$  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。

$P^n(i, j)$  を定式化するにあたり、以下の効用関数を定義する。

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

$$= \mathbf{B}_{ij} \mathbf{X}^n_{ij} + \varepsilon^n_{ij} \quad (14)$$

$U^n_{ij}$  : 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

$\mathbf{B}_{ij}$  : パラメータベクトル

$\mathbf{X}^n_{ij}$  : 説明変数ベクトル

このように効用関数を定式化すると、 $P^n(i, j)$  は、

$$P^n(i, j) = \frac{\exp(\mathbf{B}_{ij} \mathbf{X}^n_{ij})}{\sum_{k \neq i} \exp(\mathbf{B}_{ik} \mathbf{X}^n_{ik})} \quad (15)$$

となる。一方、状態  $i$  における滞留時間に関する値  $\lambda_i^n$  については、その非負条件を考慮して、

$$\lambda_i^n = \exp(\mathbf{H}_i \mathbf{Z}^n_i) \quad (16)$$

$\mathbf{H}_i$  : パラメータベクトル

$\mathbf{Z}^n_i$  : 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  $\mathbf{B}_{ij}$ 、 $\mathbf{H}_i$  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  $\mathbf{X}^n_{ij}$ 、 $\mathbf{Z}^n_i$  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(12)を用いて算定することができる。

なお、離散選択における効用水準と滞在時間についての値  $\lambda_i^n$  との間、すなわち、任意の  $i$  についての  $\lambda_i^n$  と  $U^n_{ji}$  ( $j \neq i$ ) との間には相関関係が存在することが推測される。それとともに、離散選択における効用水準間にも、特に、全ての  $j$  についての  $U^n_{ij}$  と  $U^n_{kj}$  ( $k \neq i$ ) との間にも相関関係が存在することも推測される。ただし、それらの相関関係を考慮した場合、後に述べる推定計算における計算コストが非常に大きなものとなることが予想された。本研究では、それらの相関関係を再現することを今後の課題として残しつつ、個人間の差異を考慮した連続時間軸上での行動モデルを構築する最初の試みとして、パネルデータに基づいた推定計算を行うこととした。

## (3) 未知パラメータ $\mathbf{B}_{ij}$ 、 $\mathbf{H}_i$ の推定方法

パラメータ  $\mathbf{B}_{ij}$ 、 $\mathbf{H}_i$  については、パネル調査によって観測される各調査時点での各個人の状態空間  $E$  内の離散状態と各説明変数、ならびに、パネル調査間隔を用いて、以下の式(17)で定式化される尤度関数を最大化することで推定する。

$$LL = \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^{L_n-1} \ln \{ p^n_{D_{l,l+1}}(S^n_l, S^n_{l+1}) \} \quad (17)$$

$N$  : パネル調査におけるサンプル数

$L_n$  : パネル調査での個人  $n$  の調査参加回数 (参加 Wave 数)

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

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

ここに、 $p^n_{D_{l,l+1}}(S^n_l, S^n_{l+1})$  は、ある個人  $n$  がある Wave  $l$  において状態  $S^n_l$  が観測されている場合に、その時点から  $D_{l,l+1}$  が経過した Wave  $l+1$  において状態  $S^n_{l+1}$  が観測される確率である。この確率は、式(15)、(16)に基づいて

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 combination | 自動車とバスの双方利用   |
| Ferry               | フェリー          |
| Other               | その他           |
| Missing             | 不明            |

表-2 推定結果

|   | パラメータ | t値     |
|---|-------|--------|
| <b>SOVのλについて (<math>H_{SOV}</math>)</b>                     |       |        |
| 定数項   | -2.15 | -22.43 |
| <b>Transitのλについて (<math>H_{transit}</math>)</b>             |       |        |
| 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 |
| <b>Carpoolのλについて (<math>H_{carpool}</math>)</b>             |       |        |
| 定数項   | -0.35 | -3.14  |
| <b>SOVからTransitへの遷移について (<math>B_{SOV, transit}</math>)</b> |       |        |
| 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   |
| <b>TransitからSOVへの遷移について (<math>B_{transit, SOV}</math>)</b> |       |        |
| 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   |
| <b>CarpoolからSOVへの遷移について (<math>B_{carpool, SOV}</math>)</b> |       |        |
| 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、 $H_i$ ,  $B_{ij}$ 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

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

特定化される行列  $A_n$  の固有値, 固有ベクトルを用いて, 式(12)に示した行列演算を行うことで求めることができる。そして, この確率の対数を, 隣接 Wave ごと, 各個人ごとに算定し, それらを足しあわせたものが式(17)の対数尤度関数である<sup>1)</sup>。

### 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。

Puget Sound Panel 調査<sup>2)</sup>は, アメリカ合衆国のシアトル都市圏で 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 世帯が抽出された。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, パネル調査では, 通勤通学手段は表-1 の 7 つのカテゴリーに分類されている。

### 4. パラメータの推定計算

一般に, 本稿 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を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  $B_{ij}$ ,  $H_i$  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 手段以外の, 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。そして本稿では, この仮定に反するサンプルを対象外として分析を進めることとした。

式(17)に基づいて尤度関数 LL を誘導するにあたっては, 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

2 Wave 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)をサンプルケースとした。

また、ここでは 3 つの離散状態を仮定しているため、各離散状態からの遷移確率は二項選択問題として定式化することができる。一般に二項選択問題では、一方の確定効用を 0 に固定し、もう一方の確定効用をパラメータと外生変数との関数で定義することで、後者の確定効用を両選択肢の確定効用の差を表すものと考えることができる。本研究では、SOV からの遷移確率を定式化する場合には Carpool の確定効用を、Transit からの遷移確率を定式化する場合には Carpool の確定効用を、そして、Carpool からの遷移確率を定式化する場合には Transit への確定効用をそれぞれ 0 に固定した。そして、それぞれの遷移におけるもう一方の選択肢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することとした。

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留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(16)の定式化、ならびに、指数分布の性質より、Carpool での滞留時間が、他の通勤手段に比較して短いことを意味している。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留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と考えられる。また、Transit については女性の方が滞留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 2 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ということが分かる。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。

## 5. モデル分析に基づく均衡状態に関する一考察

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、各々の個人の Wave 5 の時点での通勤手段を条件として与えた場合の、Wave 5 の実施時点からの経過時間別の SOV、Transit、Carpool のそれぞれの利用確率を、式(12)および式(15)、(16)に基づいて算定した。ただし、説明変数ベクトル  $\mathbf{X}_{i,t}^n$ 、 $\mathbf{Z}_{i,t}^n$  としては、Wave 5 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 Wave 5 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。

$$S_{i,t} = \frac{1}{279} \sum_{n=1}^{279} P_{i,t}^n \quad (18)$$

$S_{i,t}$ : Wave 5 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

$P_{i,t}^n$ : Wave 5 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(12)および式(15)、(16)より算定)

この方法を用いて算定した、Wave 5 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 に示す。

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ないことが分かる。すなわち、少なくとも、今回用いているサンプルにおける通勤手段シェアは均衡状態を迎えてはおらず、仮に外生変数が一切変化しないという極めて強い仮定のもとにおいても、通勤手段シェアが均衡状態<sup>[2]</sup>に達するまでには、おおよそ 10 年の時間が必要であることが分かる。

当然ながら、外生変数である年齢は時間の経過に伴って積み重ねられるものであり、世帯人数や自動車保有台数が変化する世帯も少なからず存在する。それに加えて、各通勤手段のサービスレベルである交通速度についても様々な原因で変化することも考えられる。すなわち、各個人の外生変数自体も動的に変化しているのである。ここで、通勤交通市場というマクロなシステムを考えた場合、個々の個人の個々の外生変数の変化の一つ一つが、システム外部からの刺激であると捉えることができる。したがって、通勤交通市場には、本稿 1. (1) で議論したシステムの現状と均衡状態との乖離の原因となるシステム外部からの刺激が無数に存在しているのである。もし、今回の数値計算において、数ヶ月程度で均衡状態が達成されるということが示されていたならば、例え、外生変数が動的に変化していたとしても、現実の通勤手段のシェアが均衡状態であると考えすることは、さほど非現実的ではないかも知れない。ところが、今回の数値計算では、外生変数が変化しない、すなわち、システムの外部からの刺激が一切ないと仮定したとしても、均衡状態の達成には 10 年もの年月が必要であることが示されている。このことから、現実の通勤手段市場における均衡状態の成立を主張することは、極めて困難であることが容易に理解されよう。

それに加えて、Wave 5 実施時点と均衡状態に達した時点における SOV と Transit のサンプル内のシェアの差は、それぞれ 11% (=68-57%)、12% (=32-20%) となっている。このことは、現状において均衡が成立しているという仮定の下で需要予測をした場合には、例え極めて正確な計算をできたとしても、少なくとも一割以上という決して小さいとは言えない推計誤差が生じることは避けられない、ということの意味している。このことも、現実の通勤手段の機関分担率を均衡理論の枠組みで推計することの妥当性が乏しいことを示唆していると言えよう。

一方、図-1 からは、Carpool のシェアについては、時間が経過してもほとんど変化しないことが分かる。ここで、先に、モデル推定結果の考察の際に述べたように、Carpool での滞留時間が、その他の交通機関での滞留時間に比べて短いものであったことを考えあわせると、Carpool のシェアは時間の経過に伴ってほとんど変化しないものの、その利用者の構成は激しく入れ替わっていることが分かる。このような知見は、集計的な解析、あるいは、静的な解析では把握し得ない知見であり、本モデルの様に、非集計的なアプローチに基づいた動的な行動モデル

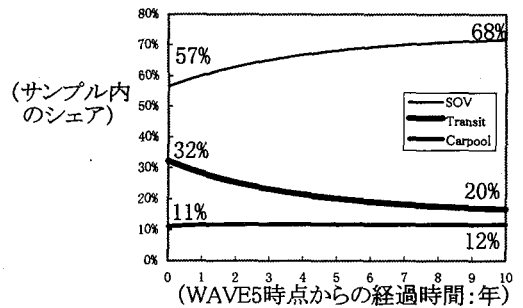


図-1 セミマルコフモデルを用いたサンプルシェアの時間変化予測

を構築することではじめて理解し得る知見である。

このように、本研究で提案した、非集計的なアプローチに基づき、かつ、連続時間を考慮した動的な行動モデルを用いることで、均衡状態の成立といったシステム全体についての何らかの仮定を施さなくても、集計化を通じて、均衡状態の成立も含めたシステム全体の挙動についての解析が行える可能性があることが分かった。それとともに、日々繰り返すことにより種々の学習が十分に進行しているものと推測される交通行動の一つである通勤行動における交通機関のシェアでさえも、現状と均衡状態との間には大きな乖離があり、かつ、外生変数が一切存在しないという強い仮定を施した場合においても両者が一致するまでにはおおよそ 10 年程度の長い年月が必要とされる、という可能性が示された。

## 6. 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集計化分析からは、本研究で提案した動的な行動モデルを用いる

ことで、例えば均衡状態を仮定することなく、均衡状態の成立も含めたシステム全体の挙動についての解析が行える可能性があることが分かった。それとともに、通勤手段シェアでさえも、現状と均衡状態の間には大きな乖離があり、かつ、外生変数が一切存在しないという強い仮定を施した場合においても両者が一致するまでにはおおよそ 10 年程度の長い年月が必要とされるという可能性が示された。このことは、均衡の成立を仮定した上で需要予測や現状の的確な記述を目指す場合には、非常に慎重な態度が要請されることを示唆しているものと言えよう。

一方、本モデルの大きな特徴は、交通現象の動的な解析を行うことが可能であるという点である。特に、個々人の交通行動に焦点を当てた交通現象モデルとなっているため、集計化分析で示されたような Carpool のシェアは時間と共に変化はしないものの、その利用者の入れ替わりは激しいものである、といった、集計的な動的モデルでは把握し得ない知見が得られることも、本モデルの特徴の一つである。また、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、あるいは、定式化において複数仮定した効用や滞留時間を規定する値 $\lambda_i$ 間の相互関係を考慮することも、今後の課題であると考えられる。

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]式(17)に示した尤度関数における $P^n_{D_{l,i}}(S^n_i, S^n_{l+1})$ は、式(7)から導かれる以下の式で定式化される行列 $\mathbf{P}^n_{D_{l,i}}$ の第 $S^n_i$ 行 $S^n_{l+1}$ 列要素である。

$$\mathbf{P}^n_{D_{l,i}} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{D_{l,i}^m}{m!} (\mathbf{A}_n)^m$$

そして、この右辺の行列 $\mathbf{A}_n$ の $i$ 行 $j$ 列要素は、式(6)、(15)、(16)より導かれる、

$$A^n(i, j) = \begin{cases} -\exp(\mathbf{H}_i \mathbf{Z}^n_i) & \text{if } (i = j) \\ \frac{\exp(\mathbf{B}_{ij} \mathbf{X}^n_{ij})}{\sum_{k \neq i} \exp(\mathbf{B}_{ik} \mathbf{X}^n_{ik})} & \text{if } (i \neq j) \end{cases}$$

という式が示すように、パラメータベクトル $\mathbf{H}_i$ ,  $\mathbf{B}_{ij}$ の関数であり、したがって、尤度関数 LL もパラメータベクトル $\mathbf{H}_i$ ,  $\mathbf{B}_{ij}$ の関数である。ここで、外生変数ベクトル $\mathbf{Z}^n_i$ ,  $\mathbf{X}^n_{ij}$ , 行動軌跡 $S^n_i$ ,  $S^n_{l+1}$ , そして、パネル調査期間 $D_{l,i}$ が全ての $n, l, i, j$ についてデータとして得られていれば、尤度関数 LL は $\mathbf{H}_i$ ,  $\mathbf{B}_{ij}$ だけの関数となり、したがって、これを最大化することでパラメータ $\mathbf{H}_i$ ,  $\mathbf{B}_{ij}$ を推定することができる。

ただし、この尤度関数 LL が未知パラメータについて凹関数である保証はない。したがって、推定計算を実施する場合には複数の初期値を離散的に与える等の処置が必要である。なお、本稿に示した推定結果は、複数の初期値を離散的に与えたにも関わらず得られたものである。

[2]Transit での滞留時間については、定数項以外に性別ダミーも推定されている。これは、男性にとっての定数項と女性にとっ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 での滞留時間の期待値は 7.71 年、女性の滞留時間の期待値は 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 での滞留時間のサンプル平均である。

[3]ここにいう均衡状態とは、各々の通勤手段のシェアが均衡している、すなわち、時間と共に各々の通勤手段シェアが変化しない状態を意味する。

## 参考文献

- 1) 北村隆一, 飯田恭敬, 杉志頼寧, 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.
- 2) 杉志頼寧, 羽藤英二, 藤原章正: パネルデータを用いた交通機関選好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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 西井和夫, 近藤勝直, 古屋秀樹 他: パネルアトリプ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.
- 6) 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.

- 7) 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.
- 8) 森村英典, 高橋幸雄: マルコフ解析, pp103-107, 日科技連出版社, 1979.
- 9) 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.

---

パネルデータを用いた連続時間軸上の個人の離散選択行動の動的モデル化: 均衡状態を仮定しない動的な需要変動解析に向けて

藤井 聡, 米田 和也, 北村 隆一, 山本 俊行

本研究では、セミマルコフモデルを適用し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、この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。構築したモデルに基づいた集計化分析からは、本研究で提案した動的な行動モデルを用いることで、均衡状態の成立も含めたシステム全体の挙動についての解析が行える可能性があることが分かった。それとともに、通勤手段シェアでさえも、現状と均衡状態の間には大きな乖離がありうることが示された。

---

***Dynamic Modeling of an Individual's Discrete Choice Behavior on Continuous Time Frame Using Panel Data: Toward Dynamic Demand Analysis without the Assumption of Equilibrium***

*By Satoshi FUJII, Kazuya YONEDA, Ryuichi, KITAMURA, and Toshiyuki Yamamoto*

A dynamic model of an individual's commute mode switching behavior along a continuous time dimension is presented. The model is specified as a semi-Markov process model of commute mode use. Its parameters are estimated using discrete-time panel data. Parameter estimates indicate that the duration of carpooling to commute is shorter than those of the other commuting modes. The average speed of each commute mode has effects on commute-mode switching behavior. A sample enumeration study using this dynamic behavioral model offers estimates of the dynamic characteristics of aggregate commute-mode shares, and the time it will take for the market to reach an "equilibrium." The numerical study thus reveals that the market is not in equilibrium even for commute travel modes.

---