

ランダム効用理論に基づく生活行動シミュレーションモデルの構築*

*An Activity Travel Simulator Based on Random Utility Theory**

藤井 聡^{**}, 門間俊幸^{***}, 北村隆一^{****}, 藤井宏明^{*****}

Satoshi Fujii, Ryuichi Kitamura, Toshiyuki Monma, and Hiroaki Fujii

1. はじめに

交通需要予測を行うにあたり、個人の一日を通じての生活パターンをモデル化し、その予測を目指すことは極めて意義のある試みである。なぜなら、個人の生活行動には、交通需要解析が対象としてきた多くの情報、すなわち、交通機関選択、目的地選択、トリップ頻度選択、トリップ出発時刻選択等が含まれているからである。

この認識から、従来においても様々な生活行動モデルが構築されてきた。マルコフモデル¹⁾や構造方程式モデル²⁾の枠組み等も生活行動モデルに適用されているが、行動原理を明示的に考慮するために効用理論を用いたモデルも数多く提案されている。Ben-Akiva and Bowman³⁾、藤井ら⁴⁾の研究では、離散選択モデルの枠組みで、効用関数を特定化している。ただし、極めて大きなものとなる選択肢集合を特定化する方法論を確立しておらず、特定化した効用関数を用いた需要予測ツールは提案されていない。効用理論を用いて個人の行動をモデル化し、かつ、個人の生活行動の再現を図るモデルとしては、STARCHILD⁵⁾⁶⁾、PCATS⁷⁾等が挙げられる。ただし、いずれのモデルでも、予測時の計算コスト削減のためにいくつかの簡略化が施されている。前者のモデルでは、実行可能な全ての生活パターン集合の部分集合をモデル上で生成した上で、個人の行動パターンの再現を図っている。また、活動時間については考慮されていない。後者のモデルでは、選択可能な全ての生活パターンを考慮しているものの、逐次的、段階的な意思決定過程を仮定している。また、活動時間を、意思決定自体を考慮した枠組みではなく、意思決定の結果を記述する Duration Model の枠組みでモデル化している。

STARCHILD や PCATS でこれらの簡略化が施されているのは、個人が実行可能な生活パターンの選択肢集合を特定化し、かつ、その中で最大の効用を与える生活パターン(以下、本稿ではこれを最適生活パターンと呼ぶこととする)を検出することが容易ではないためであろう。なぜなら、

生活パターンは、活動数、活動内容、場所、および、交通機関といった様々な要素によって規定されるものであり、したがって、選択肢集合が極めて大きなものとなるのである。ただし、活動数、内容等の要素で異なる生活パターンについての選択モデルを、単一の効用関数を仮定した上で、かつ、STARCHILD や PCATS の様な簡略化を施さずに構築することで、交通機関や目的地、トリップ頻度等の従来では個別に構築されてきた選択行動を、それらの間のトレードオフを考慮した上で統一的にモデル化することとなるものと期待される。

本研究ではこの点に着目し、個人の生活行動を効用理論に基づいて再現する生活行動シミュレータの構築を図る。本シミュレータでは、効率的に最適生活パターンを検出することを目的として、動的計画法を導入した。なお、本研究で提案する効用理論に基づいて、個人の生活行動の軌跡を再現する生活行動シミュレーションモデルを、PCTAS-RUM(Prism Constrained Travel-Activity Simulator based on Random Utility Maximization)と呼ぶこととした。

2. シミュレーションの概要

本シミュレーションでは、個人の1日の時間は場所、時間等を自由に決定できる自由時間帯と、それらの要素が予め決まっている固定時間帯とに分類されるものと考え、そして、固定時間帯での行動スケジュール、交通ネットワーク属性、地域属性をシミュレーションモデルに入力することで、自由時間帯での行動パターンを出力する。

モデル内では、個々の活動を、場所、内容、開始時刻、終了時刻で表現し、個々の移動を交通機関、出発時刻、到着時刻で表現する。個々の活動場所を市区町村コードで、活動内容を宅外活動と在宅活動の2つのカテゴリーで、交通機関を公共交通機関、自動車、自転車、徒歩の4つのカテゴリーで、また、活動内容を在宅活動と宅外活動の2つのカテゴリーでそれぞれ表現した。また、活動の開始時刻については、後で述べる自由行動効用モデルの選択肢集合を有限集合とするために、離散変数として取り扱った。

本シミュレーションモデル内の仮想個人は、固定時間帯では、入力データとして与えられる固定活動スケジュール

*キーワード: 交通行動分析, アクティビティ分析, マイクロシミュレーション
** 正 員 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻
(〒606-01 京都市左京区吉田本町, TEL075-753-5136, FAX075-753-5916)
*** 正 員 建設省
**** 正 員 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻
***** 学生員 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻

に基づいて行動する。一方、自由時間帯では、仮想個人は意思決定を行い、その意思決定に基づいて行動する。本シミュレーションモデルでは、この意思決定を効用理論に基づいて構築された自由行動効用モデルで再現する。以下 3. では、この自由行動効用モデルについて述べる。

3. 自由行動効用モデル

自由行動効用モデルは、個人が実行可能な全ての生活パターンの中で最大の効用を与える生活パターンを、動的計画法⁸⁾に基づいて検出するサブモデルである。本章では、自由行動効用モデルの仮定と定式化を(1)と(2)で、そして、シミュレーションにおける動的計画法の適用方法について(3)でそれぞれ述べる。なお、効用関数内の未知パラメータの推定方法、ならびに、推定結果については、文献9)あるいは10)を参照されたい。

(1) 個人の生活行動についての仮定

個人の生活行動についてのモデルを構築するためには、個人の生活パターンを定量的に表現することが不可欠である。ここでは、はじめに生活パターンの定量的表現方法について述べる。

ある個人のある自由時間帯での生活パターンは、その自由時間帯に実行される複数の活動と移動の連鎖で表現されるものとする。そして、活動 l ($l=1, 2, \dots, L$) は、活動内容 m_l 、活動場所 z_l 、開始時刻 t_l 、実行時間 d_l で特定化されるものとする。なお、活動内容 m_l のカテゴリーには移動も含まれるものとする。ただし、活動内容が移動の場合には、 z_l は定義しない。そして、以下の行列 S で生活パターンを定量的に表現する。

$$S = \begin{pmatrix} m_1 & m_2 & \dots & m_L \\ z_1 & z_2 & \dots & z_L \\ t_1 & t_2 & \dots & t_L \\ d_1 & d_2 & \dots & d_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{m} \\ \mathbf{z} \\ \mathbf{t} \\ \mathbf{d} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここに $\mathbf{m}$, $\mathbf{z}$, $\mathbf{t}$, $\mathbf{d}$ は、それぞれ活動 1 から活動 L までの内容、場所、開始時刻、時間を表すベクトルである。

一方、個人は、以下の最適化問題の解として与えられる生活パターンを実行するものと仮定する。ここに、効用関数 $U(\cdot)$ を先に定義した行列 S の関数として定義し、個人は、行列 S を決定するものとする。

$$OBJ. U(S) = U(\mathbf{m}, \mathbf{z}, \mathbf{t}, \mathbf{d}) \rightarrow \max \quad (2)$$

S.T.

1) **ブリズム制約**: 自由時間帯内で実行する全ての移動と活動の時間総和は、自由時間帯の長さに等しく、か

つ、それぞれの活動の活動場所間の移動時間は交通機関の利用可能性と交通ネットワーク特性によって規定される、という制約。

2) **交通機関制約**: 交通機関の利用可能性についての制約であり、以下の 3 つを考慮する。

- ・鉄道営業時間外では、鉄道は利用できない。
- ・ある場所を起点とする自動車あるいは自転車を用いたトリップを実行する場合、その場所にその個人が利用可能な自動車あるいは自転車がなければならない。
- ・再び固定活動実行のために立ち寄る予定のない場所（自宅、職場以外の場所等）に、自動車あるいは自転車を放置したまま、異なる場所に移動することはできない。

3) **目的地認知制約**: ある場所を自由活動の実行場所として認識していない場合、その場所で自由活動を実行することはできない（なお、個人の目的地の認知についてはプロビットモデルを適用してモデル化した）。

(2) 生活効用関数の定式化

効用関数 $U(\cdot)$ を移動と活動の双方で得られる効用の和として定式化する。

$$U(S) = UA(S) + UT(S) \quad (3)$$

$UA(\cdot)$: 活動に伴う総効用関数

$UT(\cdot)$: 交通行動に伴う総効用関数

そして、 $UA(\cdot)$, $UT(\cdot)$ を、それぞれ個々の活動と移動で得られる効用の総和という形で定式化し、かつ、個々の活動、移動の効用を活動時間、活動場所、内容等の関数と考え、以下のように定式化した。

$$UA(S) = \sum_{i=1}^I \exp(A^p X^p_i + \varepsilon^p_i) \ln(DP_i) + \sum_{j=1}^J \exp(A^h X^h_j + \varepsilon^h_j) \ln(DH_j) \quad (4)$$

$$UT(S) = \sum_{k=1}^K V_k + \varepsilon^t = \sum_{k=1}^K (A^t X^t_k) + \varepsilon^t \quad (5)$$

ここに、 I, J, K はそれぞれ宅外自由活動、在宅自由活動、移動の活動数、 A^p, A^h, A^t はそれぞれ宅外自由活動、在宅自由活動、移動の実行に伴う効用についてのパラメータベクトル、 $\varepsilon^p, \varepsilon^h, \varepsilon^t$ はそれぞれ誤差項、 DP_i, DH_j はそれぞれ宅外自由活動 i 、在宅自由活動 j の実行時間、 X^p_i, X^h_j, X^t_k はそれぞれ、生活パターン n の宅外自由活動 i 、在宅自由活動 j 、移動 k の実行に伴う効用に影響を及ぼす説明変数

表-1 仮想個人の属性と固定活動スケジュール

○個人属性・世帯属性 54才、男性、会社員、世帯収入1500万円、 免許保有歴30年、世帯自動車保有台数1台
○固定活動スケジュール 職場での仕事終了時刻:17時 自宅での就寝時刻:22時 (ただし、居住地域:貝塚市、職場地域:大阪市北区) 通勤交通機関は、自動車に固定

表-2 テストケース

ケース0) 生活環境に変化なし。
ケース1) 仕事終了時刻が18時になる。
ケース2) 自動車保有台数が0となる。
ケース3) 自動車通勤時間が30分長くなる。

表-3 仮想個人の生活行動の再現結果

	直帰	寄り道	外出	その他	移動時間 平均	在宅自由 時間平均	宅外自由 時間平均
ケース0	21回	49回	30回	0回	89.9分	133.2分	76.9分
ケース1	28回	55回	17回	0回	75.9分	107.2分	56.9分
ケース2	5回	93回	0回	2回	135.8分	76.3分	87.8分
ケース3	21回	58回	21回	0回	97.6分	116.4分	86.1分

ベクトルである¹¹⁾。本研究では、これらの外生変数として個人属性(年齢、性別)、世帯属性(世帯内続柄)に加えて、地域属性(地域別サービス事業所数密度)等を用いた。なお、式(4)で対数関数を用いているのは、時間資源の消費に伴って限界効用が逓減することを表現するためであり、指数関数を用いているのは限界効用の非負条件を満たすためである¹¹⁾。

(3) 最適生活パターンの検出方法

本シミュレータのサブモデルである自由行動効用モデルでは、動的計画法⁹⁾を用いて、前項(2)に示した3つの制約条件を満たす全ての生活パターンの中から最大の生活効用を与える生活パターン、すなわち、最適生活パターンを効率的に検出することとした。ただし、選択肢集合を有限とするために、活動開始時刻を離散変数(10分単位)とした。

計算手順としては、まず、活動数を共有する複数の生活パターンの中で最大の効用を与えるものを動的計画法で検出する。そして、予め最大の活動数を設定し、活動数1から最大活動数までのそれぞれの最適な生活パターンを比較し、最適生活パターンを検出する。

個々の活動数別の最適生活パターンの検出にあたっては、個々の活動の開始時点ステージとみなし、一つ目の活動から順次利得(ここでは、個々の活動、移動の実行に伴う効用)を式(2)(3)に基づいて算定し、最後の活動に至るまでの最適政策(ここでは、最適生活パターン)を検出するという方法を用いた。ただし、効用算定にあたっては、誤差項をその分布に基づいてランダムに発生させた。また、

本項b)に示した3つの制約条件を満たさない生活パターンについては、検索対象から除外した。

4. シミュレータの適用例

以上に述べたシミュレーションモデルを用いて、表-1に示した仮想個人の生活パターンを、表-2に示した4つのケースの下で100回再現した結果を表-3に示す。

表-3より、自由時間帯が短くなるケース1の場合、直帰する回数が増加することが分かる。これは、自由時間帯が短くなることで、自由活動を実行する生活パターン数が減少することが原因であると思われる。一方、自動車が通勤に使用なくなるケース2)に着目すると、寄り道が極端に大きなものとなっていることが分かる。これは、本シミュレータでは、自動車でのトリップチェーンを実行する場合、そのチェーンが自宅、職場、あるいは、それら以外の固定活動場所をベースとする場合を除いて、他の交通機関を選択することはできないものと仮定しているが、本シミュレータで用いている生活効用関数では、徒歩の移動抵抗が他の機関に比べて小さいことが原因であると考えられる。すなわち、自動車を用いず通勤をしている場合には、上述の交通機関についての制約が存在せず、したがって、移動抵抗の小さな徒歩で職場から寄り道場所へ移動できるため、本シミュレータではケース2)での寄り道が大きなものとなったと考えられる。

また、ケース3)に着目すると、寄り道の再現頻度が高く、外出の再現頻度が小さくなっていることが分かる。これは、通勤時間が長くなることで、外出パターンを選択した場合に実行する宅外の自由活動時間が短くなり、したがって、外出パターンの効用が低下する。また、通勤時間が長くなることで、直帰パターンの在宅時間が減少し、直帰パターンの効用も低下する。ただし、直帰パターンでは在宅時間が十分に長く、かつ、限界効用が低減することから、効用の低下率は、さほど大きくない。また、寄り道パターンの効用には変化が無い。これらから、ケース3)では、相対的に外出の選択確率が低下する一方で、寄り道の選択確率が増加したものと考えられる。

この様に、本シミュレータは、ケース2)の計算結果において極端な計算結果が得られたものの、交通環境、生活環境が及ぼす影響を論理的に解釈することができる。これは、効用理論に基づいて個人の生活行動の意思決定を直接的にモデル化したためであると考えられる。このことから、本シミュレータを用いることで、従来のモデルでは捉え切れなかった、政策が個人の生活に影響を与える際の種々の因果連鎖をモデル上で再現することができるものと考えられる。

すなわち、本シミュレータを用いて、政策が個人の生活行動に及ぼす影響の特徴をよりの確に把握することが可能であるものと期待される。

5. おわりに

本研究では、効用理論に基づいて個人の生活行動軌跡を再現する生活行動シミュレータPCATS-RUMを構築した。本シミュレータでは、個人の意思で生活パターンを決定できる自由時間帯での生活パターンを、ランダム効用理論の枠組みで構築した自由行動効用モデルで再現する。

自由行動効用モデルは、従来では個別にモデル化されてきた、トリップ頻度選択、活動時間選択、内容選択、目的地選択、交通機関選択といった多様な選択行動を単一の効用関数に基づいて説明することを目指したモデルであり、このモデルを用いることで、活動時間と活動数、あるいは、活動時間と目的地といった、個人の行動における様々なトレードオフを考慮することができるものと考えられる。ただし、生活パターンの選択モデルの構築を図る場合には、極めて大きなものとなる選択肢集合の取り扱いが重要な課題点であるが、動的計画法を用いることで全選択肢集号から最大の効用を与える最適生活パターンを効率的に検出することとした。

本シミュレータを用いて、仮想的な個人の複数の仮想状況下での生活行動を再現し、それについて検討を加えてみたところ、本シミュレータを用いることで交通環境や生活環境が生活行動に及ぼす影響を論理的に解釈することができることが分かった。これは、効用理論に基づいて個人の生活行動の意思決定を直接的にモデル化したためであると考えられるが、このことから、本シミュレータを用いて、政策が個人の生活行動に及ぼす影響の質、あるいは、特徴をよりの確に把握することが可能であるものと期待されるものと考えられる。

なお、数値計算例では、極端に特定のツアー特性の再現頻度が高いケースが存在する等も示されており、政策の影響を交通需要量という形で量的に評価するために、本稿で示した現時点でのPCATS-RUMをそのまま適用することは困難であると思われる。この点に改良を加えるためには、効用関数内に導入した複数の誤差項間の相関を考慮すること等が必要であるものと考えられる。それに加えて、本研究で提案したシミュレーションモデルの最も基本的な前提である効用最大化原理そのものにも、検討を加えることが必要であるものと考えられる。

最後に、調査および資料の提供に際して阪神高速道路

公団に全面的な協力を頂いた。また、分析にあたっては、文部省科学研究費基盤(B)(2)の助成を受けた。ここに記して深甚な謝意を表します。

[注 1] X_i^a, X_i^b, X_i^c は、行列 S の行ベクトルである活動開始時刻ベクトル t 、活動場所ベクトル z 、交通機関ベクトル m によって異なった値をとる。また DP_i, DH_i は活動時間ベクトル d の要素である。したがって、式(4)(5)の右辺は、行列 S の関数である。

【参考文献】

- 1) Kitamura, R. and Lam, T.N.: A Time Dependent Markov Renewal model of Trip Chinning, *Transportation and Traffic Theory*, pp. 376-402, 1983.
- 2) 藤井 聡・北村隆一・門間俊幸: 誘発交通需要分析を目指した就業者の活動パターンに関する研究, 土木学会論文集, No. 562/IV-35, pp. 109-120, 1997.
- 3) Ben-Akiva, M. and Bowman, J., An Activity Based Disaggregate Travel Demand Model System with Daily Activity Schedules, to appear in *Transportation Research*, 1997.
- 4) 藤井 聡・北村隆一・瀬戸公平: 生活行動に伴う個人の効用を考慮した生活行動—交通行動モデルシステムの開発, 土木学会論文集, No. 562/IV-35, pp. 83-96, 1997.
- 5) Recker, W.W, McNally, M.G and Root, G.S: A Model of Complex Travel Behavior, Part 1: Theoretical Development, *Transportation Research*, 20A, pp. 307-318, 1986.
- 6) Recker, W.W, McNally, M.G and Root, G.S: A Model of Complex Travel Behavior, Part 2: An Operational Model, *Transportation Research*, 20A, pp. 319-330, 1986.
- 7) 藤井 聡, 大塚祐一郎, 北村隆一, 門間俊幸: 時間的空間的制約を考慮した生活行動軌跡を再現するための行動シミュレーションの構築, 土木計画学研究・論文集, No.14, -印刷中-, 1997.
- 8) Bellman, R. (1957) *Dynamic Programming*, Princeton University Press.
- 9) 藤井聡, 北村隆一, 門間俊幸: 効用理論に基づく生活行動モデルシステムの構築, 日本行動計量学会第25回大会発表論文抄録集, -印刷中-, 1997.
- 10) Fujii, S., Kitamura, R. and Monma, T. (1997) A Micro-Simulation Model System That Produces Individual's Activity-Travel Patterns Based on Random Utility Theory, prepared for Institute for Operations Research and the Management Sciences, San Diego.
- 11) Kitamura, R., Yamamoto, T., Fujii, S. and Sampath S. (1996) A Discrete-Continuous Analysis of Time Allocation to Two Types of Discretionary Activities Which Accounts for Unobserved Heterogeneity, *Transportation and Traffic Theory - Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, pp. 431-454.