

離散連続モデルを適用した動学的相互調整過程

若林由弥¹・羽藤英二²

¹学生会員 東京大学大学院 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
E-mail: wakabayashi@bin.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学大学院教授 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
E-mail: hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp

特定の集団を対象とするマイクロなサービスを展開する際、集団内での相互作用を考慮したシステムの開発が重要である。本研究の目的は、複数人から構成される集団内での個人の選択行動が、他者の行動から影響を受けているという構造を明らかにすることである。そこで本研究では世帯内での出発時刻や活動時間に注目し、相互作用項を含んだ離散連続モデルを用いることで、世帯内での行動における相互作用の存在を検証した。その結果、出発時刻の選択において確かに他者の出発時刻の選択確率が相互作用として影響を与えていることを明らかにした。また、出発時刻の選択構造の動的な特性にも注目し、前日の選択に影響を受けているという仮定の下でモデルの動学化を行い、検証を行った。

Key Words : *discrete-continuous model, local interaction model, structural estimation*

1. はじめに

カーシェアリングやデマンドバスなど、不特定多数の個人ではなく特定の集団を対象としたマイクロなサービスを展開する際、その集団の構成要員同士の間で成り立つ相互作用や集団全体から受ける協調効果を考慮した交通システムの開発が、安定的な運営を行う上で重要となってくる。こうした中で実際に利用者間の相互作用について明示的に取り扱った研究はほとんどない。つまり、従来の独立した意思決定に基づくシステムでは、コミュニティ内での個人間の相互作用や動学的特性を考慮していないため、効率的な運用が難しいといえよう。

本研究の目的は、複数人から構成される集団内での個人の選択行動が他者の行動から影響を受け、同時に他者の行動にも影響を及ぼしているといった、相互作用の構造を明らかにすることである。そこで本研究では世帯内での出発時刻や活動時間に注目し、離散連続モデルをベースとした、個人間相互作用を含んだモデルを適用することで、世帯内での行動における相互作用の存在を検証する。最終的に、出発時刻の選択において他者の選択と自分の選択が相互作用として影響を与えあっている構造を、構造推定による計算によって明らかにすることを目指す。同時に、選択構造の動的な特性にも注目し、前日の選択結果が翌日の選択結果に影響を及ぼすという仮定のもとモデルの動学化を行う。これにより出発時刻の選択に置ける動的特性についての知見を得ることを目指す。

2. 研究のフレーム

(1) 既往研究の整理と本研究の位置づけ

集団内における生活行動について分析した研究として、ゲーム理論による表現や社会的相互作用の研究等があげられる。

ゲーム理論を用いた相互作用の表現については Bell et al.(2004)¹⁾のタクシーサービスの研究などがある。ゲーム理論は、複数の主体(プレイヤー)が存在する状況下の意思決定を研究対象とした分野であり、互いの利益が一致しない状況において、自らの利得が他者の戦略に依存している状況や、それに対する戦略について解明を試みている。この理論は動学的な問題にも適用することができ、動学化されたゲーム理論を特に進化ゲーム理論と呼ぶ。進化ゲーム理論では、静学的なゲーム理論に比べ、プレイヤーの学習アルゴリズムや意思決定の不確実性、プレイヤーの均質性について説明することができるという点で優れている。

社会的相互作用を取り扱った分析手法としては、相互作用を受ける人物を特定したローカルインタラクションモデルと、集団全員から平均的に影響を受けるグローバルインタラクションモデルの大きく2つに分けることができる。代表的な研究としてグローバルインタラクションモデルを適用した例として、福田ら(2002)⁷⁾の違法駐輪行動に関する研究で駐輪場所の選択が集団の選択割合に影響される構造が示されている。ローカルインタラクションモデルについては Draganska et al.(2008)²⁾の企業の立地戦略に関する研究などがある。

本研究では、社会的相互作用を用いたモデルのうち、

個人間の相互作用を記述することができるローカルインタラクションモデルを用いて集団における相互作用の定式化を行う。特に世帯内での出発時刻の選択において、相互作用項を含む動的な離散連続モデルにより異時点間のマルチェージェントの意思決定の変化を記述したモデルの提案を行う。本研究は家庭内というミクロなスケールの集団内における、動学的な生活行動を記述するという点に独自性がある。

(2) 定式化のフレーム

a) activity-based approach

人の1日の活動は、その日に行われる1つ1つのトリップではなく、それらトリップの連鎖によって生まれるトリップ・チェーンによって特徴づけられる。そのため、活動を分析する場合には生のトリップデータではなく、トリップデータを加工し新しくツアーのデータを作成する必要がある。本研究では自宅を出発地とするトリップから帰宅トリップまでの一連のトリップ・チェーンをツアーデータと定義づけ、これらのツアーデータを元に分析を行う。

b) 離散連続モデル

本研究では、離散連続モデルを用いて1日の活動の出発時刻/活動時間の選択構造を定式化する。離散連続モデルは、離散的な選択行動と連続量に関する選択行動が関連付けられている構造を記述することができるモデルで、離散問題と連続問題を独立に推定した場合に生じるサンプリングバイアスを修正することができる。本研究では離散連続モデルの1つである、Tobit-Vモデル (Maddala,1983)³⁾を用いた。このモデルは誤差項分布の相関関係を表す関数に正規 copula を仮定したモデルと捉えることができ、また誤差項の分布にガンベル分布を仮定することで多項選択問題に拡張することが可能であることが示されている (Lee,1983)⁴⁾。

Tobit-V モデルは、2項選択問題および、それぞれの選択肢における連続問題の以下の3つの式からなる。

$$y_s = \begin{cases} 0 & (u_s > 0) \\ 1 & (u_s \leq 0) \end{cases} \quad (1)$$

$$y_{c1} = \begin{cases} u_{c1} & (u_s > 0) \\ 0 & (u_s \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$y_{c2} = \begin{cases} 0 & (u_s > 0) \\ u_{c2} & (u_s \leq 0) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 y_s は離散問題の選択結果、 y_{c1} は、 $y_s = 1$ を選んだ際の連続問題の選択結果、 y_{c2} は、 $y_s = 0$ を選んだ際の連続問題の選択結果を表す。また、 u_s は離散問

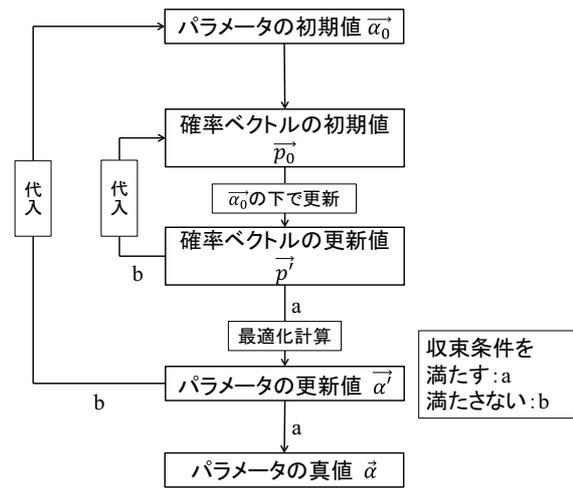


図-1 NPL 法による計算プロセス

題の効用関数、 u_{c1} 、 u_{c2} は各選択肢での連続量を表し、以下の式で表される。

$$u_s = \beta_s x_s + \varepsilon_s \quad (4)$$

$$= v_s + \varepsilon_s \quad (5)$$

$$u_{c1} = \beta_{c1} x_{c1} + \varepsilon_{c1} \quad (6)$$

$$= v_{c1} + \varepsilon_{c1} \quad (7)$$

$$u_{c2} = \beta_{c2} x_{c2} + \varepsilon_{c2} \quad (8)$$

$$= v_{c2} + \varepsilon_{c2} \quad (9)$$

β はパラメータベクトルで、 x は説明変数ベクトルである。また、 ε_s 、 ε_{c1} 、 ε_{c2} はそれぞれの誤差項を表す。このとき、誤差項は以下のような共分散構造に従う3変量正規分布と仮定する。

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_s \\ \varepsilon_{c1} \\ \varepsilon_{c2} \end{pmatrix} \sim N \left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & \rho_1 \sigma_1 & \rho_2 \sigma_2 \\ \rho_1 \sigma_1 & \sigma_1^2 & 0 \\ \rho_2 \sigma_2 & 0 & \sigma_2^2 \end{pmatrix} \right) \quad (10)$$

ただし、ここでの ρ_1 、 ρ_2 は離散値の効用関数と連続量の誤差項の相関係数、 σ_1 、 σ_2 は連続量の誤差項の標準偏差である。

c) NPL 法

相互作用を加えた式には、自分の効用関数に他者の選択結果の決定確率が入れ子となって含まれている。また、同様に他者の効用関数にも自分の選択確率の決定確率が入れ子となって含まれている。このような、式同士が互いに入れ子になっている問題を解くための手段として構造推定アプローチがあげられる。構造推定アプローチは、

表-1 PP 調査概要

期間	2009/10/29 2009/11/27
対象者 (世帯数)	24 人 (12 世帯)
トリップ数	2784 件
ツアー数	429 件

表-2 ツアーパターン内訳

ツアーパターン	データ数
非義務 HOH	110
HOOH	47
HOOOH	17
HOOOOH	11
HOOOOOH	3
HOOOOOOH	5
義務 HWH	188
HWOH	35
HWOOH	10
HWOOOH	2
HOWH	1
HOWOH	1

個人が特定の経済理論モデルの中で最適な行動をとっているという前提の下で、その経済理論を特定化するパラメータを推定する手法である。構造推定アプローチの包括的なレビューには Aguirregabiria and Mira(2010)⁵⁾が存在する。本研究では、構造推定アプローチの1つである NPL 法 (Nested Pseudo Maximum Likelihood Algorithm, Aguirregabiria and Mira, 2002)⁶⁾を用いる。NPL 法の計算プロセスを図 1 に示す。このように、確率 \vec{p} を代入し最適化した効用関数に基づいて再び確率 $\vec{\alpha}$ を更新する、という計算を $\vec{\alpha}$ が収束するまで繰り返すことにより、入れ子の構造を解くことが可能となる。

3. データ

(1) データ概要

本研究では、2009年に横浜都市圏で実施されたプローブパーソン調査(以下PP調査)データを用いる。PP調査とは、携帯電話やスマートフォンと連動したダイアリーを用いてモニターの移動活動記録と位置を計測する調査であり、同一個人の長期間の移動経路と活動内容が把握できる点に大きな特徴がある。PP調査はトリップ時にリアルタイムでトリップ開始・終了データを収集し、出発時刻や移動時間といった個人の時間利用に関するデータを大量かつ正確に取得することができる。また、PP調査などの紙媒体の調査では無視されがちな、短時間の移動についても記入漏れがなく、加速度情報や位置情報とともに詳細なデータを得ることができるのも大きな特徴といえよう。データの概要を表1に示す。

また、トリップデータを加工して得られたツアーパターンの内訳は表2に示した通りである。全体的な傾向として、ストップ数が3から4以下のものが多いことが分かる。

(2) データ分析

a) 出発時刻

出発時間の分布について、図2に義務トリップを含むツアー(以下、義務ツアーと呼ぶ)及び義務トリップを含まないツアー(以下、非義務ツアーと呼ぶ)の出発時刻の分布を示す。義務ツアーは6時から8時の午前中に集中して分布している。一方非義務ツアーは午前から午後まで広く分布している。このことから、義務

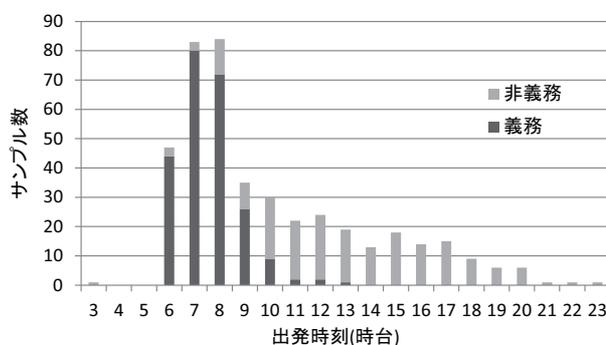


図-2 義務ツアー・非義務ツアーの出発時刻分布

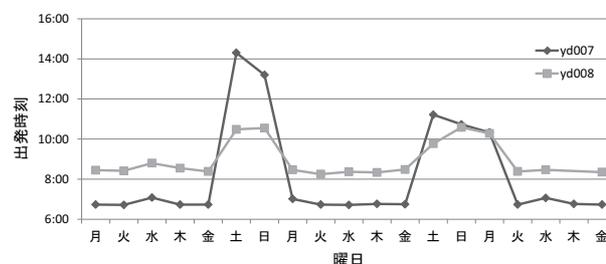


図-3 出発時刻の変動

ツアーの選択は出発時刻の選択に大きな影響を与えていると推測できる。

次に、出発時刻の日変動を、図3に示す。モニターのうち1世帯の夫婦(yd007,yd008)の出発時刻の推移を集計すると、月曜日から金曜日にかけての平日は両者ともほとんど変動がないことが分かる。平日の出発時刻を選択する時、前日の出発時刻の影響を強く受けていると考えられる。

b) 活動時間

1日の活動時間の分布を図4に示す。義務ツアーと非義務ツアーの活動時間の分布を集計したところ、義務

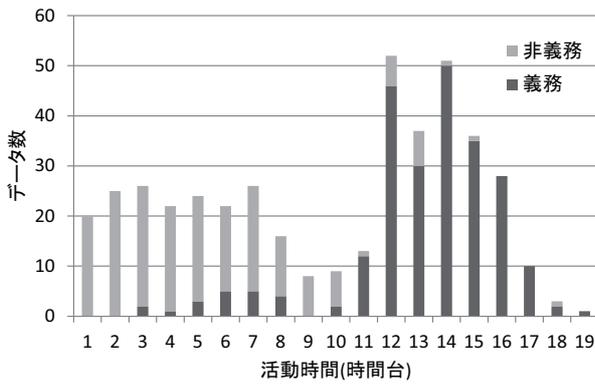


図-4 義務ツアー・非義務ツアーの活動時間分布

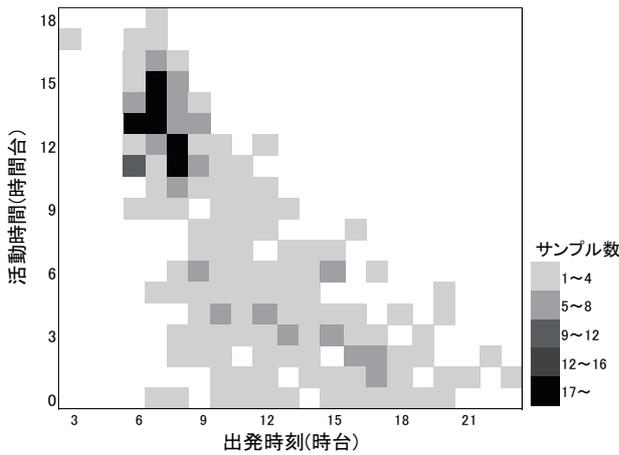


図-5 出発時刻及び活動時間の同時分布

ツアーの活動時間はほとんどが10時間以上で長時間であるのに対し、非義務ツアーの活動時間は8時間以内の短時間のものが多いことが分かる。次に、出発時刻と活動時間の分布の関係について同時分布を図5に示す。図より出発時刻が早いほど活動時間が長くなる傾向にあることが分かる。出発時刻と活動時間に負の相関関係があり、その選択構造が独立でないことを示している。

4. モデルの定式化

(1) 出発時刻/活動時間選択モデル

前章で分析した結果を踏まえ、離散連続モデルをベースに出発時刻/活動時間の選択を以下のように定式化する。離散選択問題、すなわち出発時刻の午前/午後選択問題における個人*i*の*d*日目の効用の確定項 v_s を以下のように仮定する。

$$v_{s,d,i} = \alpha_0 + \beta x_{am,i,d-1} + \gamma p_{d,-i} \quad (11)$$

ここで、 α_0 は定数項、 $x_{am,i,d-1}$ は前日に*i*が午前に出発したことを表すダミー変数、 $p_{d,-i}$ は同日に配偶者が午前中に出発する確率である。

表-3 出発時刻-外出時間選択モデル推定結果

説明変数	パラメータ	t 値
出発時刻	定数項	1.094 2.76 *
	前日ダミー	0.010 0.16
	相互作用	0.803 1.59
外出時間 (午前)	定数項	2.469 21.61 **
	HOH	-0.600 -3.92 **
	HOOH	-0.322 -2.12 **
	HOOOH	-0.272 -1.24
	HOOOOH	-0.118 -0.72
	HWH	0.227 1.95
	HWOH	0.186 1.43
	HWOOH	0.147 0.93
	定数項	3.075 13.62 **
外出時間 (午後)	HOH	-0.107 -0.97
	HOOH	0.356 2.58 *
	HOOOH	-
	HOOOOH	0.609 0.64
	HWH	3.384 1.95
	HWOH	6.011 2.45 *
	HWOOH	-
	標準偏差 (午前)	0.612 -8.98 **
	誤差項分布	相関係数 (午前)
	標準偏差 (午後)	2.004 5.99 **
	相関係数 (午後)	0.998 5.49 **
サンプル数		428
初期対数尤度		-1284.95
最終対数尤度		-184.24
対数尤度比		0.857
修正済み尤度比		0.822

* は5%有意, ** は1%有意

連続問題について、活動時間の確定項 v_c を以下の式12のように仮定する。

$$v_{cj \in J\{1,2\}} = t_{0cj} + t_{cj} x_{tour} \quad (12)$$

t_{0cj} は定数項、 x_{tour} はツアーパターンのダミー変数ベクトルである。

以下、式11及び式12の仮定のもと、離散連続モデルのパラメータを推定する。

(2) 推定結果

モデルの推定結果は表3のようになった。モデルの全体的な適合度を表す修正済み尤度比は0.822で、このモデルは説明力を持つことが分かる。

出発時刻選択問題について、前日に午前中に出発したことを表すダミー変数のパラメータの値のt値は有意でない。出発時刻の選択構造においては前日の選択結果はそれほど影響を与えていないことが分かる。原因としては、平日と休日で選択に大きな差があるため、ただ前日の選択結果と置いただけでは十分な評価ができていないからと考えられる。次に、相互作用項のパラメータについて、t値は有意には達していないもののある程度の値を持っており、パラメータの値は正值なので、配偶者が午前中に出かける確率が高いほど、自身も午前中に出かける確率が高くなるという構造が存在すると考えられる。

活動時間については、各ダミー変数のパラメータの値は、ストップ数が増えるほど大きくなっており、およそ現実に即した値をとっている。また、離散問題の誤

差分布と連続問題の誤差項の分布の関係は、午前中に出発した場合の活動時間との相関関係は-0.959でかなり強い負の相関関係を持っているのに対し、午後に出発した場合の活動時間との相関関係は0.998で強い正の相関関係を持っている。出発時刻と外出時間には密接な関係があることが分かる。

5. 結論

(1) 結論

本研究では、離散連続モデルによる出発時刻/活動時間の選択モデルに相互作用項を加えることで、世帯内における出発時刻の選択構造に相互作用の効果を検証した。その結果、以下のことが明らかになった。

- 離散連続モデルを用いることで、活動時間の選択構造に発生しうるバイアスを補正した推定を行うことができた。
- 出発時刻の選択において、世帯内の他者の選択構造が自身の選択構造に影響を与えている構造が明らかになった。
- 動学的には、前日の選択結果からほとんど影響を受けておらず、逐次的に選択を行っているという結果が得られた。要因としては平日と休日の選択構造の違いが考えられる。

(2) 今後の展望

本研究においては、出発時刻選択において午前午後 of 単純な2項選択構造について定式化を行ったが、実際の生活行動においてはさらに細かい分け方における

選択構造が必要になる。説明変数についても活動目的と相互作用、および前日の活動結果のみを取り扱ったが、政策評価を行う上では、費用や移動先についての評価も欠かせないので、明示的に組み込む必要がある。また、本研究では相互作用項のパラメータを全ての個人で等しいものとしているが、現実的には相互作用は非対称な構造を持つと考えられるので、パラメータを分けて推定することが今後の課題として挙げられる。

参考文献

- 1) Wong K.I., Wong S.C., Bell M.G.H. and Yang H: Modeling the bilateral micro-searching behavior for urban taxi services using the absorbing Markov chain approach, *Journal of Advanced Transportation*, Vol.39, pp.81-104, 2004.
- 2) Draganska, M., Misra, S., Aguirregabiria, V., Bajari, P., Einav, L., Ellickson, P., Horsky, D., Narayanan, S., Orhun, Y., Reiss, P., S eim, K., S ingh, V., Thomadsen, R. and Zhu, T. : Discrete choice models of firms, strategic decisions, *Marketing Letters*, Vol.19, pp.39-416, 2008. Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- 3) Maddala, G. S. : Limited-Dependent and Qualitative Variables in Econometrics, *Cambridge University Press*, Cambridge, 1983.
- 4) Lee, L.-F. : Generalized econometric models with selectivity, *Econometrica*, Vol.51, pp507-512, 1983.
- 5) Aguirregabiria, and V., Mira, P. : Dynamic discrete choice structural models, *Journal of Econometrics*, Vol.156, pp38-67, 2010.
- 6) Aguirregabiria, V. : Pseudo maximum likelihood estimation of structural models involving fixed-point problems, *Economics Letters*, Vol.84, pp.335-340, 2004.
- 7) 福田大輔, 上野博義, 森地茂: 社会的相互作用を考慮した選択行動モデルによる自転車駐輪行動の分析, 土木学会第57回年次学術講演会, pp.21-22, 2002.

Dynamic mutual adjustment process on discrete-continuous model applied

Yuya Wakabayashi and Eiji Hato