

# 始業時刻選択モデルの構造推定

小林 渉<sup>1</sup>・角田 隆太<sup>2</sup>・柳沼 秀樹<sup>3</sup>・岩倉 成志<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 芝浦工業大学大学院 理工学研究科 (〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)

E-mail: na17103@shibaura-it.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 前芝浦工業大学大学院 理工学研究科 (〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)

E-mail: me13055@shibaura-it.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 東京理科大学 講師 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

E-mail: yaginuma@rs.tus.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 芝浦工業大学 教授 工学部土木工学科 (〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)

E-mail: iwakura@sic.shibaura-it.ac.jp

朝ラッシュ時間帯の慢性的な混雑と遅延問題解決に向けて、需要側である鉄道利用者に対して出勤時刻の変更を促すTDM施策が考えられる。しかしながら、鉄道利用者の出発時刻は始業時刻に制約されるため、本研究では、企業の始業時刻選択のモデル構築を行った。具体的には、離散選択モデルを基本として、地域間の経済のつながりを表現する時間集積変数を導入したモデルを構築した。自社の始業時刻選択確率に他社の選択確率が含まれる内生構造となっているため、構造推定手法を援用したパラメータ推定を実施した。その結果、時間集積を示すパラメータは都心部よりも郊外部で大きくなり、都心部では他地域の始業時刻が影響しておらず、郊外部では都心部の始業時刻に影響されていることが明らかになった。

**Key Words :** *Work start time choice, Discrete choice model, Structural estimation, TDM*

## 1. はじめに

東京圏の都市鉄道における通勤時間帯の混雑および遅延問題の解決は急務である。問題解決に向けた対策には、供給側である鉄道事業者と需要側である鉄道利用者およびその雇用者である企業に働きかける対策がある。供給側の対策には、複々線化や保安設備の改良など線路容量を向上させるものがある。需要側の対策には、オフピーク通勤や鉄道の時間帯別課金、企業に対する始業時刻に対する課金制度などで始業時刻を分散させ、乗車時間帯の分散させる TDM 施策 (Travel Demand Management) が挙げられる。

ここで始業時刻の分散に関して、第 11 回大都市交通センサス (2010 年に実施) から得られた東京圏のエリア別始業時刻を見ると、東京 23 区の中心部である都心 3 区、副都心 3 区と外縁部の区では、中心部の方が始業時刻が遅い傾向が見られた<sup>1)</sup>。このことは、郊外部から 23 区中心部と外縁部へ通勤する利用者の鉄道利用時間帯が重複し、現状の列車混雑・遅延問題を悪化させている可能性を示唆している。そのため、

通勤者の鉄道乗車時間帯を決定する上で大きな要因と考えられる始業時刻に TDM 施策を行うことで、始業時刻・通勤時間帯を変動させることで、最混雑時の列車混雑と遅延緩和が期待される。

企業の始業時刻と交通混雑に関して、Henderson<sup>2)</sup>は、企業は関係する企業間の就業時間を重ねることで、生産性の向上を示す「時間集積性の経済」を考慮したモデルを提唱している。これは、特定の地域・企業に対し始業時間帯別課金を実施する場合には、関連する他地域の企業も同調して始業時刻を変化させることを示唆している。しかしながら、時間集積性を考慮した始業時刻選択行動に関する研究は散見されるが理論的な研究が多く、具体的な地域での実証的な分析を行っている既往研究は非常に少ない。

以上を踏まえて、本研究の目的は、企業に対する TDM 施策の可能性を検討するために、東京圏を対象に時間集積性を考慮した始業時刻選択モデルの構築を試みる。

## 2. 既往研究の整理

Henderson<sup>2)</sup>は企業の始業時刻と交通混雑を同時に考慮した時差出勤制度の効果を初めて検証している。ここでは、始業時刻と生産性の関係をモデル化されており、企業間の就業時間が重なることによる生産性向上をしめす時間集積の経済が提唱されている。実際に原田・鍋山<sup>3)</sup>は、東京の上場企業に対する始業時刻の決定理由に関するアンケートを行っている。複数の企業において社外（取引先）との関係（50%）や、顧客サービスとの関係（35%）により始業時刻の決定している企業が多く、関連会社と就業時間を重ねるように始業時刻を決定していることが確認されている。

Henderson の枠組みを参考に多くの始業時刻を扱う研究が行われている。佐藤・赤松<sup>4)</sup>は Henderson のモデルを基に、住宅地区と CBD が単一の道路で結ばれた都市を想定し、唯一の経路上に存在するボトルネック渋滞を考慮した始業・出発時刻均衡モデルを構築している。ここでは、始業時刻が 1 点に集中する場合と、分散する場合、同時に発生する場合の複数の均衡状態があることが確認された。奥村・水野<sup>5)</sup>は PT 調査の個票データを用いて、入社・退社時刻モデルを構築している。また企業の労働時間帯決定モデルを時間集積性の指標を含めて構築しているが、定式化にとどまっており、具体的な変数を導入したモデルの推定は行われていない。文・米川<sup>6)</sup>は通勤者の通勤行動と企業の生産活動をモデル化し、フレックスタイム制導入に関する企業行動を分析する均衡モデルを構築している。ここでは、固定始業とフレックスタイム制度の最適採用企業数がシミュレーションより求められている。高山<sup>7)</sup>は、これら従来研究の課題として、均衡状態の安定性が未確認である点を挙げている。そしてボトルネック渋滞と離散的な始業時刻が表現可能な始業・出発時刻均衡モデルを構築し、均衡状態の一般特性を明らかにしている。柳沼・岩倉<sup>8)</sup>は東京圏に存在する法人の取引データ等を用い、ゲーム理論を応用して企業をプレイヤーとする始業時刻決定モデルの構築を行っている。30 社を抽出し非営利法人に対し時間帯別課金を行ったシミュレーションでは、始業時刻が分散していく様子を確認している。ただし、利潤関数の時間集積を示す変数が統計的に有意でない点やシミュレーションする企業数が少ない点が課題としてある。

これらの研究を整理すると、始業時刻の決定行動のモデル化は行われているものの、理論的な定式化にとどまっているものや、始業時刻と混雑を一体的に取り扱ったものは、単一の OD ペアによる仮想空間上のモデル構築が多い。しかし実際の通勤者の行動は、OD ペアやボトルネック箇所が複数存在していること、

通勤者の始業時刻は地域ごとの産業特性等により異なっていると考えられ、実データを用いた始業時刻選択行動のモデル化を行う必要性は高いと考える。

以上を踏まえ、本研究では東京圏を対象に、始業時刻に対する政策介入の効果が定量的に計測することを考える。始業時刻選択モデルは東京圏 189 市区町村を対象に、大都市交通センサスから得られた各区の始業時刻の分布などを用いて、地域間の時間集積に基づく相互作用をゲーム理論に基づく枠組みで構築する。また、このモデルは各プレイヤーの効用関数に他地域の始業時刻の選択確率が入れ子になるモデルを想定しているため、構造推定を用いてパラメータを推定する。

## 3. 始業時刻選択モデルの構築

### (1) 始業時刻選択モデルの基本的な考え方

本研究では利潤最大化を仮定し、各市区町村の始業時刻 7:30~10:30 までを 30 分間隔で離散化した 7 選択肢の始業時刻選択行動のモデル化を行う。具体的には地域別時間帯別の利潤関数を構築し、その中に時間集積を表す変数を導入することで、地域間の相互作用を考慮した始業時刻選択行動を表現する。

地域  $i$  が始業時刻  $t$  を選択する際の確率  $p_{it}$  は式(1)のようなロジット型（誤差項は独立かつ同一なガンベル分布を仮定）の選択確率式とし、効用関数は始業時刻別の利潤関数  $\pi_{it}$  とし、以下式(2)を構築する。

$$p_{it} = \frac{\exp(\pi_{it})}{\sum_{t=1}^7 \exp(\pi_{it})} \quad (1)$$

$$\pi_{it} = Y_{it} \cdot \theta I_{it}^* - C_{it} \quad (2)$$

ここで  $Y_{it}$  は生産額、 $C_{it}$  は費用、 $I_{it}^*$  は時間集積を表す変数、 $\theta$  はパラメータである。費用  $C_{it}$  は後述する政策シミュレーションの時刻別課金の設定時に用いる。生産額  $Y_{it}$  はコブ=ダグラス型の生産関数をもとに式(3)のように構築する。

$$Y_{it} = AK_i^\alpha L_i^\beta \quad (3)$$

ここで、 $A$  は定数項、 $K_i$  は資本、 $L_i$  は労働、 $\alpha, \beta$  はパラメータである。

時間集積変数  $I_{it}^*$  は関連企業の就業時間を考慮する戦略的相互関係が地域間にも作用する考えのもと、自地域とつながりのある地域の始業時刻を考慮したうえで自地域の始業時刻を決定する戦略的行動を表現するものであり、式(4)のように定式化する。

$$I_{it}^* = \sum_{j=1}^J p_{jt} T_{ij} \quad (4)$$

ここで、他地域  $j$  の始業時刻  $t$  の選択割合  $p_{jt}$  と当該地域  $i$  と他地域  $j$  との業務目的トリップ割合  $T_{ij}$  との積とする。ただし  $i, j \in J$  である。

## (2) 使用データ

### a) 大都市交通センサス

まず 2010 年実施の第 11 回大都市交通センサスから、各市区町村の始業時刻を抽出する。始業時刻は以下の条件を満たすサンプルを抽出した。

- 乗車時刻、降車時刻、始業時刻、イグレス所要時間が明確である。
- 1 回目の移動が定期利用かつ通勤目的であり、目的地が明確で、自宅から出発している。

以上の条件を満たすサンプルを拡大すると、4,787,007 人となり、その中で東京 23 区に通勤しているのは 3,380,359 人であった。なお、自宅から出発している条件を加えたのは、本研究が「自宅から勤務先に通勤する」という日々の習慣的な行動を扱うためである。

続いて時間集積変数 $I_{it}^*$ の設定のために必要となる、市区町村間のつながりの強さの指標の抽出を行う。本研究では、大都市交通センサスの業務目的のトリップを市区町村ごとに集計し、発生・集中交通量を合計して、自地域のトリップ量の総和に対するトリップの割合を算出することで市区町村間のつながりとする。そこで始業時刻を集計する際に抽出したサンプルの 2 回目のトリップから以下の条件を満たすものを抽出した。

- 勤務先から、勤務先到着時刻よりも遅い時刻に業務目的でのトリップを開始している。
- 目的地のゾーンが明確であり、かつ目的地は自宅ではない。

以上の条件を満たすサンプルを抽出し拡大すると、315,359 トリップが抽出された。

### b) 経済センサス

本研究では、前項の大都市交通センサスとの調査年次に乖離はあるが、2012 年経済センサス活動調査<sup>9)</sup>の結果を用いる。具体的には「企業産業(大分類)、単一・複数(2 区分)別企業等数、事業所数、従業者数、売上(収入)金額、費用、付加価値額及び設備投資額—市区町村」のデータを用いる。本研究では市区町村毎に全ての産業を合計した値をそれぞれ用いる。

## (3) パラメータ推定結果

本研究の始業時刻選択モデルの利潤関数である式(2)に式(3)および式(4)を代入すると、次の式(5)のようになる。

$$\pi_{it} = AK_i^\alpha L_i^\beta \cdot \theta \sum_{j=1}^J p_{jt} T_{ij} - C_{it} \quad (5)$$

本研究では、始業時刻別の生産額のデータが無いことから、段階的にパラメータを推定する。第一に時間集積変数を除いた基本的な生産関数である式(6)を対数変換した式(7)でパラメータ推定を行う。

$$Y_i = AK_i^\alpha L_i^\beta \quad (6)$$

$$\ln Y_i = \ln A + \alpha \ln K_i + \beta \ln L_i \quad (7)$$

ここで、 $A$  は定数項、 $K_i$  は資本、 $L_i$  は労働、 $\alpha, \beta$  はパラメータである。経済センサスにある、地域別の売上高、有形固定資産、従業者数のデータを用いて  $A, \alpha, \beta$  を推定する。第 2 に式(7)で推定したパラメータを式(5)に入力し、時間集積変数のパラメータである  $\theta$  を推定する。

### a) 構造推定

式(2)の利潤関数は、時間集積変数 $I_{it}^*$ に、他地域の始業時刻選択確率の情報が入れ子になっているため、一般的な尤度関数を正確に定義できない。そこで本研究では、構造推定によって時間集積変数のパラメータ  $\theta$  を推定することを考える。

構造推定とは、分析の対象とする意思決定主体が、特定の経済理論モデルの中で最適化行動をとっており、観測されたデータが最適化行動や均衡状態を表現している前提の下で、モデルのパラメータを推定することである。本研究では、柳沼・福田<sup>10)</sup>、松村・福田ら<sup>11)</sup>が用いた、Aguirregabiria and Mira<sup>12)</sup>による疑似最尤法の 1 つである Nested Pseudo Maximum Likelihood を用いる。

なお、Nested Pseudo Maximum Likelihood は、以下「NPL」とする。NPL は、他者の選択確率の初期値に観測値などを与え尤度関数を定義したものを疑似尤度として定義し、繰り返し計算を行い疑似尤度を更新することでパラメータを推定する手法である。推定するパラメータベクトル  $\theta$ 、各地域の選択確率ベクトル

$$p = \frac{\exp(\theta, P)}{\sum \exp(\theta, P)} = F(\theta, P) \quad P = \frac{\sum p}{N}, \text{ 対数尤度関数}$$

$LL(\theta, P) = \sum_{i \in j} \varphi_{it} \ln(F(\theta, P))$ , ( $\varphi_{it}$  は実際選択したものに 1, それ以外は 0) とする。N は地域数の 189 である。推定は以下のステップで行う。

Step1:  $P$  に初期値(観測値) $P^0$  を与える。

Step2: 初期値を用いて疑似尤度を最大化するパラメータを推定する。それを  $\hat{\theta}^1 = \operatorname{argmax}_\theta LL(\theta, P)$  とする。

Step3: Step2 で求められたパラメータ  $\hat{\theta}^1$  と  $P^0$  を用いて、選択確率を算出し、 $\hat{p}^1 = F(\hat{\theta}^1, P^0)$  とする。

Step4: Step3 で求められた  $\hat{p}^1$  より  $P^1$  を求め、それを新たな初期値に用いて、Step2 と Step3 の手順をパラメータが収束するまで繰り返す。

なお、本研究では収束の条件は、算出された選択確率と、その 1 ステップ前でプロセスで計算されたパラメータ値の差の絶対値が  $10^5$  以内に収まった場合としている。この構造推定は、柳沼・福田<sup>10)</sup>によれば、疑似尤度を用いた繰り返しの計算というものが、ゲームにおける最適応答と同様のプロセスと見なすことができる」と述べられている。そのため、構造推定による



パラメータ推定は地域間の戦略的な意思決定行動のモデル化にも優位性があると考えられる。

**b)推定結果と再現性**

式(5)のパラメータを段階的に推定した結果を示す。なお、時間集積変数 $I_{it}^*$ は地域によって考慮するレベルが異なると考えられる。従って時間集積変数のパラメータ $\theta$ は「都心 11 区(千代田区, 中央区, 港区およびそれらに隣接する区)」、「都心 11 区以外の区となる地域(世田谷区や横浜市中区など)」およびそれら以外の「市町村」にパラメータを構造化して推定した。推定結果を表-1 に示す。都心 11 区のパラメータが他地域の値と比較して小さい。これは、都心 11 区が他地域の始業時刻に左右されず始業時刻を決定しているということ、都心以外の市区町村では都心の始業時刻に合わせた始業時刻設定をしていることが確認できる。

また、本研究では時間集積変数のみでは企業の始業時刻決定行動の説明はできないと考え、すべての地域のすべての時間帯に定数項を入れてパラメータ推定を行っている。

**4. おわりに**

本研究では、朝の東京圏の市区町村をプレイヤーとした時間集積性を考慮した始業時刻選択モデルを構築した。始業時刻の選択確率に他地域の選択確率が含まれる入れ子の構造のため、構造推定の一種であるNPLを用いてパラメータ推定を行った。時間集積を示すパラメータは、郊外部よりも都心 11 区が小さく、当該地域においては他地域の始業時刻に影響されず始業時刻を決定していること、郊外部においては都心 11 区の始業時刻に影響され始業時刻が決定されていることが明らかになった。

**参考文献**

- 1) 国土交通省：平成 24 年度大都市交通センサス分析調査 報告書, 2013.

**表-1** パラメータ推定結果

	変数	パラメータ	t値
A	定数項	5.755	8.09 **
K	$\alpha$ 資本(百万円)	0.312	8.98 **
L	$\beta$ 労働(人)	0.819	17.7 **
自由度調整済み決定係数 0.964			**1%有意
I*	$\theta_1$ 都心11区	0.244	
	$\theta_2$ 上記以外の区	5.494	
	$\theta_3$ 上記以外の市町村	9.187	

- 2) J.V.Henderson：経済理論と都市 折下 功 訳, 日本交通政策研究会研究双書 4, 勁草書房, 1987.
- 3) 原田知可子, 鍋山弘道, 岩倉成志：ゲーム理論を用いた企業の始業時刻推定手法に関する研究, 土木学会第 59 回年次学術講演会, Vol.59, pp.743-744, 2004.
- 4) 佐藤慎太郎, 赤松隆：企業と家計の相互作用を考慮した始業・出発時刻均衡モデル, 土木計画学研究・論文集, No.23(4), pp.903-910, 2006.
- 5) 奥村誠, 永野光三：企業行動からみた出社・退社時刻の要因分析, 第 32 回日本都市計画学会学術研究論文集, pp.79-84, 1997.
- 6) 文世一, 米川誠：フレックスタイムが交通混雑に及ぼす影響, 日本交通政策研究会, 1999.
- 7) 高山雄貴：ボトルネック渋滞を考慮した出発・始業時刻均衡モデル, 土木計画学研究・講演集, Vol.47, NO.363 (CD-ROM), 2013.
- 8) 柳沼秀樹, 岩倉成志：ゲーム理論を用いた企業の始業時刻推定手法に関する研究, 土木学会第 62 回年次学術講演会, Vol.62, pp.31-32, 2007.
- 9) 総務省統計局：平成 24 年経済センサス活動調査, <http://www.stat.go.jp/data/e-census/2012/> (2017 年 7 月 25 日閲覧), 2012.
- 10) 柳沼秀樹, 福田大輔：混雑外部性を内生化した離散選択モデルと構造推定, 土木計画学研究・講演集, Vol.37, NO.225 (CD-ROM), 2008.
- 11) 松村杏子, 武藤滋夫, 福田大輔, 柳沼秀樹：混雑した都市鉄道における出発時刻選択モデルの構造推定, ゲーム理論に基づいた実証研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.45, NO.165 (CD-ROM), 2012.
- 12) Aguirregabiria, V. and Mira, P. : Sequential Estimation of Dynamic Discrete Games, *Econometrica*, Vol.75, No.1, pp.1-53, 2007.