時間配分を考慮した出発時刻選択行動分析*

Departure time choice with the time allocation: Empirical analysis of rail-use commuters in Tokyo*

加藤浩徳**・川口高志***

By Hironori KATO** and Takashi KAWAGUCHI***

1. はじめに

時間帯別料金等のように，時刻によって交通サービスレベルを変更することにより，交通需要を管理する手法が，注目を浴びるようになって久しい．こうした施策の導入効果を把握するためには，旅行者の出発時刻選択行動の理解が不可欠である．そのため，出発時刻選択行動に関する研究は，これまで多数行われてきた．例えば，Small[1)]は，目的地への早着・遅延といったスケジュール費用によって出発時刻の効用水準が定まるという前提の下，出発時刻選択に対して離散選択モデルを適用している．

本研究は，鉄道利用者を対象として，出勤時の出発時刻選択行動を，時間配分を考慮したモデルを用いることによって分析することを目的とするものである．分析に当たっては，混雑料金に関するアンケート調査から得られた，東京圏都市鉄道利用者の時刻選択行動データを用いることとする．

2. モデル

(1)基本的なモデル構造

都市鉄道を利用して通勤する個人は，一日の時間の制約のもとで，自らの効用水準を最大とするように，諸活動に配分する時間と活動の開始時刻とを決定しているものと仮定する．本研究では，個人の時間配分・時刻選択行動を，次に示される条件付効用最大化問題として定式化する．

$$\max U\left(t_s, t_a, t_g, T_s, T_l^1, T_l^2, T_l^3\right) \tag{1}$$

subject to

$$T_s + T_w + T_l^1 + T_m^2 = T_1$$

$$t_a = t_s + T_s + T_l^1 + T_m^1$$

$$t_a = t_g + T_{office}$$

$$t_s > 0,\quad t_a > 0,\quad t_g > 0,$$

$$T_s > 0,\quad T_l^1 > 0,\quad T_l^2 \geq 0,\quad T_l^3 > 0$$

ここで，t_s：就寝時刻；t_a：出社時刻；t_g：出勤時の会社最寄り駅到着時刻；T_s：睡眠時間；T_l^1：朝余暇時間（起床してから出社するために家を出発するまでの余暇時間）；T_l^2：寄り道余暇時間（退社後，帰宅するまでの余暇時間）；T_l^3：夜余暇時間（帰宅後，就寝するまでの余暇時間）；T_w：就業時間；T_m^1：出勤時の通勤時間；T_m^2：退社してから家までの移動時間；T：前日の就寝時刻から当日の就寝時刻までの時間である．

なお，効用関数中の活動開始・終了時刻は，時刻によって変動する，鉄道運賃ならびに鉄道車両内混雑度を通じて，効用を生じさせるものと考える．時刻に関わる変数が正値であるという制約条件を課しているが，基準値の取り方によって必ず正にすることができるので，その一般性は失われない．また，寄り道余暇は 1 日のうちに行わない可能性もあるのでその活動時間は 0 となることを許容するが，それ以外の朝余暇，夜余暇は必ず行われるものと考えられるので，正値という制約条件を設定している．

(2)効用関数の特定化

直接効用関数 U は，就寝時刻 t_s の選択に伴う効用 $u_{ts}(t_s)$，出社時刻 t_a の選択に伴う効用 $u_{ta}(t_a), u_{tw}(t_a)$，出勤時の会社最寄り駅到着時刻の選択に伴う効用 $u_C(t_g), u_R(t_g)$，睡眠時間 T_s の消費に伴う効用 $u_{Ts}(T_s)$，朝余暇時間 T_l^1，寄り道余暇時間 T_l^2，夜余暇時間 T_l^3 の消費に伴う効用 $u_{Tl1}(T_l^1), u_{Tl2}(T_l^2), u_{Tl3}(T_l^3)$ の線形和で表されるものと仮定する．すなわち，以下の式が成り立つとする．

---

*キーワーズ：時刻選択行動，時間配分モデル，混雑料金，都市鉄道利用者

*正員，博（工），東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻（東京都文京区本郷 7-3-1，TEL03-5841-7451，FAX03-5841-8506，e-mail：kato@civil.t.u-tokyo.ac.jp）

***修（工），元東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻

$$
\begin{aligned}
&U\left(t_s, t_a, t_g, T_s, T_l^1, T_l^2, T_l^3\right) \\
&\quad = u_{ts}(t_s) + u_{ta}(t_a) + u_{tw}(t_a) + u_C(t_g) + u_R(t_g) \\
&\qquad + u_{Ts}(T_s) + u_{Tl1}\left(T_l^1\right) + u_{Tl2}\left(T_l^2\right) + u_{Tl3}\left(T_l^3\right)
\end{aligned}
$$

次に，各変数の部分効用関数u については，次のように特定化する．第一に，$u_{ts}(t_s)$は，個人が就寝時刻t_s に対して選択する際の基準となる望ましい時刻t_s^0，就寝期待時刻t_s^0 を持ち，式(2)に示されるように，就寝時刻が就寝期待時刻より遅いときに，就寝期待時刻から離れた時間に比例して効用が単調減少するものとする．

$$
u_{ts}(t_s) = \alpha_s\left(t_s - t_s^0\right)\cdot H\left(t_s - t_s^0\right) = \begin{cases} \alpha_s\left(t_s - t_s^0\right) & \left(t_s \geq t_s^0\right) \\ 0 & \left(t_s < t_s^0\right) \end{cases} \quad (2)
$$

なお，$H(\cdot)$：ヘビーサイド関数である．

第二に，$u_{ta}(t_a)$は，個人が出社時刻t_a に対して選択する際の基準となる望ましい時刻である出社期待時刻t_a^0 を持ち，式(3)のように，その時刻から離れるほど離れた時間に比例して効用が単調減少するものとする．

$$
u_{ta}(t_a) = \begin{cases} \alpha_a(t_a - t_a^0) & \left(t_a \geq t_a^0\right) \\ -\alpha_a(t_a - t_a^0) & \left(t_a < t_a^0\right) \end{cases} \quad (3)
$$

第三に，$u_{tw}(t_a)$は，会社の始業時刻t_w と出社時刻t_a とにより発生する効用で，式(4)で示されるように，出社時刻t_a が始業時刻t_w より遅いときに，遅刻した時間に比例して効用は単調減少するとする．

$$
u_{tw}(t_a) = \alpha_w\left(t_a - t_w^0\right)\cdot H\left(t_a - t_w^0\right) = \begin{cases} \alpha_w\left(t_a - t_w^0\right) & \left(t_a \geq t_w^0\right) \\ 0 & \left(t_a < t_w^0\right) \end{cases}
$$

(4)

第四に，$u_C(t_g)$は朝の鉄道の混雑により生じる効用である．鉄道の乗車時間が一定であるとすると出勤時の会社最寄り駅到着時刻t_g を基準にとして乗車中の混雑を把握することができる．$u_C(t_g)$は，式(5)で示されるように，乗車時間×平均混雑率に比例して単調減少するものとする．

$$
u_C(t_g) = \alpha_C T_{train} Cong(t_g) \quad (5)
$$

第五に，$u_{Tl1}\left(T_l^1\right), u_{Tl2}\left(T_l^2\right), u_{Tl3}\left(T_l^3\right)$は，それぞれ朝余暇時間，寄り道余暇時間，夜余暇時間の消費によって発生する効用で，消費する時間に従って単調増加するが，限界効用は逓減するものとする．そこで，式(6)のような対数関数を用いることとする．

$$
u_{Tl1}\left(T_l^1\right) = \beta_{Tl1}\ln\left(T_l^1 + 1\right) \quad (6a)
$$

$$
u_{Tl2}\left(T_l^2\right) = \beta_{Tl2}\ln\left(T_l^2 + 1\right) \quad (6b)
$$

$$
u_{Tl3}\left(T_l^3\right) = \beta_{Tl3}\ln\left(T_l^3 + 1\right) \quad (6c)
$$

第六に，$u_{Ts}(T_s)$は，睡眠時間T_s に従って単調増加するが，限界効用は逓減するものとする．式(7)で示される対数関数を用いることとする．

$$
u_{Ts}(T_s) = \beta_{Ts}\ln(T_s + 1) \quad (7)
$$

第七に，$u_R(t_g)$は鉄道の運賃によって生じる効用で，式(8)のように，最低運賃に対する運賃の比$R(t_g)$に比例して単調増加するものとする．ここで変数がt_g になっているのは混雑料金が徴収されるのが到着駅であると仮定しているためである．

$$
u_R(t_g) = \alpha_R \cdot R(t_g) \quad (8)
$$

なお，部分効用関数で導入された各係数については，個人間での異質性を考慮すること，ならびにその正負を勘案して，以下のように定式化する．

$$
\alpha_s = -\exp(A_s X_n),\ \alpha_a = -\{\exp(A_a X_n) + \varepsilon_a\} \quad (9a,b)
$$

$$
\alpha_w = -\exp(A_w X_n),\ \alpha_C = -\exp(A_C X_n) \quad (9c,d)
$$

$$
\alpha_R = -\exp(A_R X_n),\ \beta_{Ts} = \exp(B_s X_n) \quad (9e,f)
$$

$$
\beta_{Tl1} = \exp(B_{l1} X_n + \varepsilon_{l1}) \quad (9g)
$$

$$
\beta_{Tl2} = \exp(B_{l2} X_n + \varepsilon_{l2}),\ \beta_{Tl3} = \exp(B_{l3} X_n) \quad (9h,i)
$$

ただし，$A_s, A_a, A_c, A_w, A_R, B_s, B_{l1}, B_{l2}, B_{l3}$：パラメータベクトル；$X_n$：個人$n$ の個人属性；$\varepsilon_a, \varepsilon_{l1}, \varepsilon_{l2}$：誤差項であ

る.

以上をまとめると，個人の効用関数は，以下のようまとめることが出来る.

$$
\begin{aligned}
&U\left(t_s, t_a, t_g, T_s, T_l^1, T_l^2, T_l^3\right) \\
&\quad = u_s\left(t_s\right) + u_{ta}\left(t_a\right) + u_{tw}\left(t_a\right) + u_c\left(t_g\right) + u_R\left(t_g\right) + \\
&u_{Ts}\left(T_s\right) + u_{Tl1}\left(T_l^1\right) + u_{Tl2}\left(T_l^2\right) + u_{Tl3}\left(T_l^3\right)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
&If \;\; t_a \geq t_a^0, then \\
&= -e^{A_s X_n}\left(t_s - t_s^0\right) \cdot H\left(t_s - t_s^0\right) \\
&\quad - \left(e^{A_a X_n} + \varepsilon_a\right) \cdot \left(t_a - t_a^0\right) \\
&\quad - e^{A_w X_n}\left(t_a - t_w^0\right) \cdot H\left(t_a - t_w^0\right) \\
&\quad - e^{A_C X_n} T_{train} Cong\left(t_g\right) - e^{A_R X_n} R\left(t_g\right) \\
&\quad + e^{B_s X_n} \ln\left(T_s + 1\right) + e^{B_{l1} X_n + \varepsilon_{l1}} \ln\left(T_l^1 + 1\right) \\
&\quad + e^{B_{l2} X_n + \varepsilon_{l2}} \ln\left(T_l^2 + 1\right) + e^{B_{l3} X_n} \ln\left(T_l^3 + 1\right)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
&If \;\; t_a < t_a^0, then \\
&= -e^{A_s X_n}\left(t_s - t_s^0\right) \cdot H\left(t_s - t_s^0\right) \\
&\quad + \left(e^{A_a X_n} + \varepsilon_a\right) \cdot \left(t_a - t_a^0\right) \\
&\quad - e^{A_w X_n}\left(t_a - t_w^0\right) \cdot H\left(t_a - t_w^0\right) \\
&\quad - e^{A_C X_n} T_{train} Cong\left(t_g\right) - e^{A_R X_n} R\left(t_g\right) \\
&\quad + e^{B_s X_n} \ln\left(T_s + 1\right) + e^{B_{l1} X_n + \varepsilon_{l1}} \ln\left(T_l^1 + 1\right) \\
&\quad + e^{B_{l2} X_n + \varepsilon_{l2}} \ln\left(T_l^2 + 1\right) + e^{B_{l3} X_n} \ln\left(T_l^3 + 1\right)
\end{aligned}
\tag{11}
$$

⑶パラメータ推定方法

クーンタッカー条件より，個人の効用最大化問題の解が満たすべき一階条件は，次のように求められる.

$$
\left.\frac{\partial U}{\partial t_s}\right|_{t_s = t_s^*} + \left.\frac{\partial U}{\partial t_a}\right|_{t_a = t_a^*} + \left.\frac{\partial U}{\partial t_g}\right|_{t_g = t_g^*} \begin{cases} = 0 & \left(t_a^* \neq t_a^0\right) \\ < 0 & \left(t_a^* = t_a^0\right) \end{cases} \tag{12}
$$

$$
\left.\frac{\partial U}{\partial T_s}\right|_{T_s = T_s^*} = \left.\frac{\partial U}{\partial T_l^1}\right|_{T_l^1 = T_l^{1^*}} \tag{13}
$$

$$
\left.\frac{\partial U}{\partial T_l^2}\right|_{T_l^2 = T_l^{2^*}} \begin{cases} = \left.\dfrac{\partial U}{\partial T_l^3}\right|_{T_l^3 = T_l^{3^*}} & \left(T_l^{2^*} > 0\right) \\ < \left.\dfrac{\partial U}{\partial T_l^3}\right|_{T_l^3 = T_l^{3^*}} & \left(T_l^{2^*} = 0\right) \end{cases} \tag{14}
$$

これより，誤差項に関して，次の式が導出される.

$$
\begin{aligned}
\varepsilon_a &= -e^{A_s X_n} H\left(t_s^* - t_s^0\right) - e^{A_a X_n} - e^{A_w X_n} H\left(t_a^* - t_w^0\right) \\
&- e^{A_C X_n} T_{train} Cong'\left(t_g^*\right) - e^{A_R X_n} R'\left(t_g^*\right) \qquad \left(t_a^* > t_a^0\right)
\end{aligned}
\tag{15a}
$$

$$
\begin{aligned}
\varepsilon_a &> -e^{A_s X_n} H\left(t_s^* - t_s^0\right) - e^{A_a X_n} - e^{A_w X_n} H\left(t_a^* - t_w^0\right) \\
&- e^{A_C X_n} T_{train} Cong'\left(t_g^*\right) - e^{A_R X_n} R'\left(t_g^*\right) \qquad \left(t_a^* = t_a^0\right)
\end{aligned}
\tag{15b}
$$

$$
\begin{aligned}
\varepsilon_a &= e^{A_s X_n} H\left(t_s^* - t_s^0\right) - e^{A_a X_n} + e^{A_w X_n} H\left(t_a^* - t_w^0\right) \\
&+ e^{A_C X_n} T_{train} Cong'\left(t_g^*\right) + e^{A_R X_n} R'\left(t_g^*\right) \qquad \left(t_a^* < t_a^0\right)
\end{aligned}
\tag{15c}
$$

$$
\varepsilon_{Tl1} = \ln\left(T_l^{1^*} + 1\right) - \ln\left(T_s^* + 1\right) + B_s X_n - B_{l1} X_n \tag{15d}
$$

$$
\varepsilon_{Tl2} \begin{cases} = \ln\left(T_l^{2^*} + 1\right) - \ln\left(T_l^{3^*} + 1\right) + B_{l3} X_n - B_{l2} X_n & \left(T_l^{2^*} > 0\right) \\ < \ln\left(T_l^{2^*} + 1\right) - \ln\left(T_l^{3^*} + 1\right) + B_{l3} X_n - B_{l2} X_n & \left(T_l^{2^*} = 0\right) \end{cases} \tag{15e}
$$

ここで，誤差項 $\varepsilon_a, \varepsilon_{Tl1}, \varepsilon_{Tl2}$ が平均 0，分散 $\sigma_a^2, \sigma_{Tl1}^2, \sigma_{Tl2}^2$ の互いに独立な正規分布に従うものと仮定する. すると，以下の尤度関数が得られる.

$$
p_a = \begin{cases}
\dfrac{1}{\sigma_a}\phi\left(\dfrac{-e^{A_s X_n} H\left(t_s^* - t_s^0\right) - e^{A_a X_n} - e^{A_w X_n} H\left(t_a^* - t_w^0\right) - e^{A_C X_n} T_{train} Cong'\left(t_g^*\right) - e^{A_R X_n} R'\left(t_g^*\right)}{\sigma_a}\right) & \left(t_a^* > t_a^0\right) \\
\Phi\left(\dfrac{e^{A_s X_n} H\left(t_s^* - t_s^0\right) + e^{A_a X_n} + e^{A_w X_n} H\left(t_a^* - t_w^0\right) + e^{A_C X_n} T_{train} Cong'\left(t_g^*\right) + e^{A_R X_n} R'\left(t_g^*\right)}{\sigma_a}\right) & \left(t_a^* = t_a^0\right) \\
\dfrac{1}{\sigma_a}\phi\left(\dfrac{e^{A_s X_n} H\left(t_s^* - t_s^0\right) - e^{A_a X_n} + e^{A_w X_n} H\left(t_a^* - t_w^0\right) + e^{A_C X_n} T_{train} Cong'\left(t_g^*\right) + e^{A_R X_n} R'\left(t_g^*\right)}{\sigma_a}\right) & \left(t_a^* < t_a^0\right)
\end{cases}
$$

$$
p_{Tl1} = \frac{1}{\sigma_{Tl1} \cdot \left(T_l^{1^*} + 1\right)} \cdot \phi\left[\frac{\ln\left(T_l^{1^*} + 1\right) - \ln\left(T_s^* + 1\right) + B_s X_n - B_{l1} X_n}{\sigma_{Tl1}}\right]
$$

$$
p_{Tl2} = \begin{cases}
\dfrac{1}{\sigma_{Tl2} \cdot \left(T_l^{2^*} + 1\right)} \cdot \phi\left[\dfrac{\ln\left(T_l^{2^*} + 1\right) - \ln\left(T_l^{3^*} + 1\right) + B_{l3} X_n - B_{l2} X_n}{\sigma_{Tl2}}\right] & \left(T_l^{2^*} > 0\right) \\
\Phi\left[\dfrac{\ln\left(T_l^{2^*} + 1\right) - \ln\left(T_l^{3^*} + 1\right) + B_{l3} X_n - B_{l2} X_n}{\sigma_{Tl2}}\right] & \left(T_l^{2^*} = 0\right)
\end{cases}
\tag{16}
$$

ただし，$\phi(\cdot)$:標準正規分布の確率密度関数; $\Phi(\cdot)$:標準正規分布の累積分布関数である.

以上で示される個人の尤度関数の要素を，全ての個人について掛け合わせたものを最大化することで，パラメータ推定を行える. これは，非線形 Tobit モデルと見なせる. なお，モデルパラメータ推定に当たっては，後述するように，現状ならびに2種類の混雑料金設定に対する個人の時刻選択ならびに時間配分に関するデータを使用するため，それらの複数ケースに対して求められる各個人の対数尤度の総和を最大化するものとする.

3．使用データとパラメータ推定結果

⑴混雑料金に関する意向アンケート調査

パラメータ推定にあたって，東京都在住の鉄道利用通勤者を対象としたアンケート調査データを使用する. アンケー

表-1 パラメータの推定結果

記号	変数名	パラメータ	t値
A_s	40，50代ダミー(40，50代ならば1，そうでなければ0)	-0.66	-0.7
	出社期待時刻における運賃(オフピーク時の運賃を1に基準化)	-2.59	-8.4
A_a	固定時刻制ダミー(勤務先の労務形態が固定時刻制ならば1，そうでなければ0)	0.04	0.1
	出社期待時刻における運賃(オフピーク時の運賃を1に基準化)	-2.70	-6.6
A_w	始業時刻における運賃(オフピーク時の運賃を1に基準化)	-2.43	-3.5
	固定時刻制ダミー(勤務先の労務形態が固定時刻制ならば1，そうでなければ0)	-2.78	-0.4
A_c	40，50代ダミー(40，50代ならば1，そうでなければ0)	-2.93	-4.4
	女性ダミー(女性ならば1，そうでなければ0)	-3.36	-1.7
B_{Ts}	既婚ダミー(既婚者ならば1，そうでなければ0)	1.06	13.9
	始業時刻における運賃(オフピーク時の運賃を1に基準化)	0.65	11.3
B_{l1}	女性ダミー(女性ならば1，そうでなければ0)	-0.10	-1.2
B_{l2}	自宅余暇志向ダミー(自宅余暇を好むならば1，そうでなければ0)	-8.80	-8.3
	始業時刻における運賃(オフピーク時の運賃を1に基準化)	0.19	0.3
B_{l3}	女性ダミー(女性ならば1，そうでなければ0)	-2.85	-3.2
	固定時刻制ダミー(勤務先の労務形態が固定時刻制ならば1，そうでなければ0)	0.51	0.7
σ^2_a	時刻に関わるパラメータ中の誤差項の分散	0.21	24.0
σ^2_{Tl1}	朝余暇時間に関わるパラメータ中の誤差項の分散	0.70	27.7
σ^2_{Tl2}	寄り道余暇時間に関わるパラメータ中の誤差項の分散	6.30	12.9

ト調査は，東京大学の研究チームによって実施され，調査実施期間は 2004 年 11 月～12 月である．アンケート調査において収集したデータは，①勤務日の一日の活動ダイアリー，②混雑料金を想定したときの勤務日の一日の活動ダイアリー（２種類の混雑料金パターンを設定），③通勤経路，④個人の属性および勤務先に関する情報，⑤混雑料金および余暇に関する意識である． 東京 23 区に立地する事業所(約 40 社)に調査協力を依頼し，東京 23 区の事業所に通勤する鉄道利用通勤者 221 名の回答を得た．

(2)パラメータ推定結果

モデルパラメータの推定結果を示したものが，表-1 である．この推定結果より，特に統計的に有意な結果が得られた変数に関して，次のような考察を行うことができる．

第一に，出社期待時刻の運賃とオフピーク時の運賃との差が大きいほど，就寝時刻が就寝期待時刻よりも遅くなることによる遅延時間に関する限界不効用が小さくなる．また，出社期待時刻とオフピーク時の運賃との差が大きいほど，出社時刻が出社期待時刻よりも遅くなることによる遅延時間に関する限界不効用が小さくなる．同様に，始業時刻の運賃とオフピーク時の運賃との差が大きいほど，出社時刻が始業時刻よりも遅くなることによる遅延時間に関する限界不効用が小さくなる．これらは，ピーク時の運賃が高いと，始業時刻に遅刻しない範囲内で，運賃の安い時間帯に出勤するインセンティブが働くこと，さらにそれによって，就寝時刻が遅くなることを苦にしなくなることを表していると考えられる．

第二に，40，50 代でかつ女性であるほど，混雑に関する限界不効用が小さくなる．女性の方が，混雑不効用が大きくなるという結果は，常識とは合致していないが，この原因は不明である．

第三に，既婚者であるほど，また始業時刻の運賃とオフピーク時の運賃との差が大きいほど，睡眠時間に関する限界効用は大きくなる．既婚者であると，配偶者との共同生活によって睡眠時間設定の自由度が低下するので，睡眠時間に関する限界効用が大きくなるのだと思われる．また，始業時刻の運賃がオフピーク時よりも高いと，始業時刻に遅刻しないように，それより早く到着する必要性が生じ，起床時刻が早まるので睡眠時間が短くなり，その結果，睡眠時間に関する限界効用が大きくなるのだと推測される．

第四に，自宅余暇を好む人ほど，寄り道余暇時間に関する限界効用は小さくなる．また，女性ほど夜余暇時間に関する限界効用は小さくなる．これは，女性が，自宅における夜余暇よりも寄り道余暇を好むことを反映している可能性がある．

4. おわりに

本研究では，鉄道利用通勤者を対象として，時間配分行動を明示的に考慮することによって，混雑料金導入時における出発時刻選択行動を表現するモデルを構築し，次に，東京圏の活動ダイアリー調査データを用いて，実際にパラメータ推定を行った．推定結果の一部には説明の付かない部分もあることから，モデルのさらなる検討が必要である．また，今回行ったような複雑な想定下での SP データ入手のための調査方法に関してもさらなる検討も必要と思われる．

参考文献

1) Small, K. A.: The Scheduling of Consumer Activities: Work Trips, The American Economic Review, Vol.72, No.3, pp.467-479, 1982.