

出発時刻選択行動モデルを用いた
通勤鉄道利用者の列車待ち時間に対する意識限界に関する実証的分析*
Analysis of Perception Threshold for Waiting Time at Station
by Departure Time Choice Model for Rail-Use-Commuters*

加藤浩徳**・家田仁***・小野田恵一****

By Hironori KATO**・Hitoshi IEDA***・Keiichi ONODA****

1. はじめに

一般に交通プロジェクトでは、交通時間の短縮が主目的とされることが多い。ところが、プロジェクト実施による所要時間の短縮がごく僅かな場合には、利用者にはその差が十分知覚されない可能性がある。そこで、人はどの程度の消費時間の差ならば、それを有効な差であると知覚し、異なる選択行動をとるようになるかという時間に対する意識の限界を知る必要があると考えられる。

この問題意識の下、家田ら¹⁾は、計量心理学で言う弁別閾(Discrimination Threshold)の概念を導入し、列車運行時隔の異なる駅において通勤者の到着時刻を観測し、利用者が当該駅での待ち時間を意識しているとみなせるか否かを分析することで、時間弁別閾値を導出した。ここで、弁別閾とは、識別可能な2つの刺激の大きさの差の最小値で、丁度可知差異(JND: Just Noticeable Difference)とも呼ばれ、被験者に刺激差が50%の正答率で知覚される値を指す²⁾。家田らは、消費時間弁別閾は平均で5分24秒であり、約1分16秒で弁別率50%、4分で同75%、11分14秒で同90%という結果を得ている。ところがここでは、通勤者のアクセス行動に対して以下のような強い仮定が置かれている。

通勤者のアクセス所要時間が、外生的に与えられるアクセス長分布と速度分布から求められる特定の分布に従うと仮定されている。

通勤者は、最寄駅到着後、最初に出発する列車に乗ることを目標に、自宅を出発していると仮定されている。

仮定 については、各通勤者の実際のアクセス行動と推定されるアクセス行動とは異なる可能性がある。また仮定 については、各通勤者の乗車希望列車に対して発生する早着・遅延の費用が適切に評価されないという問題点がある。

そこで本研究では、通勤者本人から直接時刻制約に関する情報を得ることで、各通勤者のスケジュール変動の費用を推定し、その上で待ち時間の意識限界を推定する。

2. 分析の基本的な考え方

(1) 通勤者の行動原理

本研究では、まず人間の行動原理として効用最大化を想定し、ランダム効用を仮定する。ここで、効用は、駅での列車待ち時間とスケジュール遅延または早着によって発生するコストから構成されると仮定する。なお、運賃については、時刻によらず一定とみなしてよいと考えられるため除外する。

時刻*i*におけるサンプル*n*の効用 U_{in} は以下の式のように表されるものとする。

$$U_{in} = at_{win} + bSDd_{in} + cSEd_{in} + dSDp_{in} + eSEp_{in} + e_{in} \quad (1)$$

ここで、 t_{win} : 駅での列車待ち時間、 SDd_{in} : 最終不遅刻列車スケジュール遅延費用、 SEd_{in} : 最終不遅刻列車スケジュール早着費用、 SDp_{in} : 乗車希望列車スケジュール遅延費用、 SEp_{in} : 乗車希望列車スケジュール早着費用、 e_{in} : 誤差項、 a, b, c, d, e はパラメータである。 e_{in} にi.i.d.ガンベル分布を仮定すると、時刻選択確率は以下のロジットモデルで表される。

*キーワード: 交通行動分析

**正会員, 博(工), 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 講師

***正会員, 工博, 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 教授

****学生会員, 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 修士課程

(〒113-8656 東京都文京区本郷7丁目3番地1号, Tel: 03-5841-6118, Fax: 03-5841-8507)

$$P_{in} = \frac{e^{V_{in}}}{\sum_i e^{V_{in}}} \quad (2)$$

(2) 各変数の定義と求め方

まず、総通勤所要時間 t は、以下のように表されると考えられる。

$$t = t_a + t_w + t_r + t_e \quad (3)$$

ここで、 t_a : アクセス所要時間、 t_w : 列車待ち時間、 t_r : 列車乗車時間 (乗換時間含む)、 t_e : イグレス所要時間である。

利用者は駅に到着後最初に発車する列車に乗車するという仮定を置き、列車待ち時間 t_w を

$$t_w = T_d - T_s \quad (4)$$

によって求める。ここで、 T_s : 通勤者の最寄駅到着時刻ならびに T_d : 当該駅での列車発車時刻については、観測によりデータを得ることとする。

次に、列車発車時刻 T_d については、通勤所要時間から以下の関係が言える。

$$T_d = T_o - (t_r + t_e) \quad (5)$$

ここで、 T_o : 就業地到着時刻である。

我が国の都市鉄道ではその所要時間は概ね一定であり、また多くの通勤者のイグレス手段が徒歩と考えられることから、その所要時間の変動は無視できるほど小さいものとみなし、乗車後の所要時間は時刻によらず一定と仮定する。するとスケジュール制約条件は、就業地に遅刻せずに到着できる最後の列車 (最終不遅刻列車) の発車時刻 T_{dd} 及び心理的な余裕を持つことができるため乗車することに決めている列車 (乗車希望列車、複数でも可) の発車時刻 T_{dp} であると考えることができる。

そこで、駅への到着者に対して観測と同時にアンケート調査票を配布し、 T_{dd} 、 T_{dp} のデータを入手するものとする。なお、スケジュール費用はそれぞれ以下のように表される。

$$SDd = \begin{cases} T_d - T_{dd} : \text{If } T_d > T_{dd} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$SEd = \begin{cases} T_{dd} - T_d : \text{If } T_{dd} > T_d \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$SDp = \begin{cases} T_d - T_{dp} : \text{If } T_d > T_{dp} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$$SEp = \begin{cases} T_{dp} - T_d : \text{If } T_{dp} > T_d \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

(3) 駅到着時刻 T_s の確率的変動の考慮

日々の通勤においては、その日の交通状況などによりアクセス所要時間が変動し、通勤者の最寄駅到着時間に影響していると考えられる。しかし観測調査から得られるのは、ある1日の各通勤者の最寄駅到着時刻のみであり、そのまま観測結果を用いて分析することは危険であると考えられる。そこで、観測結果の最寄駅到着時刻に、アンケートの回答を基にした確率的な分布を与えることで、アクセス所要時間の変動を考慮して分析する。

アンケートでは平均的なアクセス所要時間 \bar{t}_a 及びその最大値 t_{aMAX} 、最小値 t_{aMIN} を尋ねている。ここで、観測日のアクセス所要時間が \bar{t}_a であったと仮定すると、自宅出発時刻 T_h は観測した到着時刻 T_{sOBS} から以下の式で推定される。

$$\hat{T}_h = T_{sOBS} - \bar{t}_a \quad (10)$$

時刻 \hat{T}_h に自宅を出発する通勤者の最寄駅到着時刻はアンケート結果から以下のように推定される。

$$\hat{T}_h + t_{aMIN} \leq \hat{T}_s \leq \hat{T}_h + t_{aMAX} \quad (11)$$

よって、本研究では T_{sOBS} に対し、(11)式の範囲で T_{sOBS} をピークにもつ確率密度分布を与えることとした。こうすることで、通勤者がアクセス所要時間の変動を考慮した上で自宅出発時刻毎の期待費用を推定し、出発時刻選択行動を行っているものとして分析することが可能となる。

(4) 列車待ち時間意識限界の計測方法

本研究では、列車運行頻度がある一定値より高いときには、通勤者が列車の待ち時間 t_w を知覚できないものとする。このときには、時刻選択行動の際、人は駅での待ち時間を意識していないと見なせるであろう。このことは(1)式における待ち時間に関するパラメータが統計的に有意であるか否かの検定によって判定可能である。そこで、パラメータ a の有意

度によって、待ち時間に対する意識限界を分析することとする。

3. データ収集

データ収集のため、首都圏の14の通勤鉄道駅を対象に、通勤者の駅到着時刻を観測した。また同時に駅到着者の一部に対して郵送回収方式のアンケート調査票を配布し、各通勤者の行動の前提となる諸条件（利用目的、鉄道利用総所要時間、アクセス・イグレス所要時間、始業時刻、最終不遅刻列車、乗車希望列車など）の情報を入手した。

調査対象駅ならびに対象時間帯の選定に当たっては、平日朝の通勤時間帯において、列車の運行時隔が一定であること、各列車のサービス水準（列車種別、行先、着席可能性など）が対象駅間でほぼ均一であること、駅到着者の到着時刻測定が容易であること、などを考慮し、表-1のような駅・時刻で調査を実施した。また調査の方法は表-2の通りである。

4. パラメータ推定及び待ち時間意識限界の試算

(1) データの作成

離散選択モデルを用いて時刻選択行動をモデル化

表-1: 実査を行った駅と平均運行時隔

実査日時(2001年)	駅名	調査箇所(入口名)	平均運行時隔	
10月24日(水)	王子神谷	1番入口・前半	251秒	
		2番入口・前半	251秒	
9:00-9:50	王子神谷	1番入口・後半	360秒	
		2番入口・後半	360秒	
11月7日(水)	7:20-8:10	大山	池袋方面行	270秒
	7:20-8:20	世田谷	三軒茶屋方面行	266秒
11月8日(木)	7:20-8:40	鷺の木	多摩川方面行	206秒
	7:10-8:40	久が原	五反田方面行	304秒
	7:50-9:10	久が原	蒲田方面行	330秒
	7:30-8:50	戸越銀座	五反田方面行	167秒
11月14日(水)	7:20-8:40	入谷	中目黒方面行	127秒
	7:30-8:20	参宮橋	新宿方面行	373秒
11月15日(木)	7:20-8:40	東あずま	-	127秒
		京成曳舟	押上方面行・押上方面行 押上方面行・青砥方入口	296秒
7:40-8:30	柴又	-	-	600秒
		7:20-8:50	戸越公園	大井町方面行
11月20日(火)	7:30-9:10	戸越公園	二子玉川方面行	218秒
11月21日(水)	7:10-8:30	下落合	西武新宿行	380秒
11月27日(火)	7:50-9:00	港町	-	300秒

表-2: 実査の方法

調査者1 調査票配布	番号を付したアンケート調査票の配布
調査者2 到着時刻観測	アンケート調査票が受け取られた時刻と受け取られた調査票の番号の記録 アンケート調査票受け取り者を含む全通勤者の到着時刻の記録

するため、観測した通勤者の駅到着時刻を、毎分00秒、30秒を中心とする45-15秒、15-45秒の30秒毎の時刻帯に離散化した。またアクセス所要時間の変動に関しては、アンケートの回答結果から、 \bar{t}_a を頂点、 $|t_{aMAX} - t_{aMIN}|$ を底辺とする三角分布で確率密度関数を与えるものとした。

(2) パラメータの推定

次に、サンプルを、そのサンプル通勤者の利用する駅の運行時隔の長短により2つのセグメントに分け、その境界を順次変化させてセグメントごとにパラメータ推定する。パラメータ推定は、以下の対数尤度の最大化により行った。

$$\ln L = \prod_n \prod_i w_{imn} \cdot d_{in} \cdot \ln P_{in} \quad (12)$$

ここで、 w_{imn} ：サンプル n が m 駅で時刻 i に観測される時、 m 駅時刻 i におけるサンプル抽出率（= m 駅時刻 i でのアンケート回収数/時刻 i における m 駅への全到着数）、 d_{in} ：アクセス所要時間の変動を考慮したサンプル n の時刻 i における選択率（ $0 \leq d_{in} \leq 1$ ）である。なお、以上のようなWESML推定を行ったのは、観測した駅や時刻によってアンケート調査票配布率や回収率が異なるためである。

(3) 推定結果及び考察

運行時隔の短い駅から順にサンプルを増やしていったときのモデルパラメータの推定結果は表-3の通りである。これより、一部の 변수でその符号が整合的でない部分も含まれるが、概ね合理的な結果が得られたことが分かる。またモデルの適合度（自由度調整済み尤度比）については、概して運行時隔の長いサンプルが増えるに連れて、徐々に低下している。これは、待ち時間に対する意識が異なるサンプルがより多く混ざることによって生じるものと考えられる。

「待ち時間」変数の t 検定値を各セグメントパターンについて示したものが図-1である。これより、最大平均運行時隔が4分30秒(270秒)以下の場合、「待ち時間」パラメータ a の t 検定値は99%有意値より低く、選択行動の際に意識されていないと言える。その反面、セグメントに平均運行時隔が4分56

表-3：時刻選択モデルのパラメータ推定結果

駅名	入谷	戸越銀座	糺の木	戸越公園(大井町)	戸越公園(二子玉川)	王子神社(前半)	世田谷	大山	京成曳舟	東あずま	港町	久が原(五反田)	久が原(蒲田)	王子神社(後半)	参宮橋	下落合
平均運行時間(秒)	127	167	206	211	218	251	266	270	296	300	300	304	330	360	373	380
標準偏差(秒)	20	44	51	31	43	32	31	42	33	0	0	60	31	0	40	74
サンプル数	93	131	246	286	324	661	725	800	890	971	983	1063	1227	1264	1291	1339
パラメータ																
待ち時間	-0.0130	0.0003	-0.0020	-0.0007	-0.0023	-0.0010	-0.0010	-0.0005	-0.0020	-0.0019	-0.0016	-0.0021	-0.0032	-0.0032	-0.0032	-0.0029
遅延：不遅刻	0.0018	0.0036	0.0053	0.0036	0.0024	0.0024	0.0024	0.0019	-0.0006	-0.0004	-0.0005	-0.0003	0.0005	0.0009	0.0012	0.0011
早着：不遅刻	-0.0019	-0.0016	-0.0031	-0.0024	-0.0023	-0.0014	-0.0014	-0.0014	-0.0015	-0.0016	-0.0016	-0.0017	-0.0017	-0.0017	-0.0018	-0.0017
遅延：希望	-0.0133	-0.0111	-0.0112	-0.0097	-0.0086	-0.0075	-0.0075	-0.0069	-0.0042	-0.0043	-0.0043	-0.0044	-0.0040	-0.0042	-0.0044	-0.0044
早着：希望	-0.0196	-0.0051	-0.0028	-0.0030	-0.0021	-0.0051	-0.0052	-0.0041	-0.0042	-0.0042	-0.0042	-0.0043	-0.0046	-0.0045	-0.0045	-0.0047
t検定値																
待ち時間	-2.50	0.08	-1.11	-0.44	-1.49	-0.98	-1.87	-0.67	-2.86	-2.96	-2.60	-3.52	-5.85	-6.06	-6.30	-5.96
遅延：不遅刻	0.45	1.89	4.50	3.53	2.60	3.66	4.40	3.41	-1.48	-1.09	-1.24	-0.70	1.70	3.07	3.94	3.74
早着：不遅刻	-3.02	-3.12	-8.12	-7.56	-7.59	-6.66	-6.65	-7.06	-8.11	-9.23	-9.28	-9.96	-10.40	-10.87	-11.38	-11.03
遅延：希望	-3.24	-5.63	-9.57	-9.22	-9.22	-12.26	-12.99	-13.53	-12.22	-13.60	-13.64	-14.45	-14.60	-15.58	-16.37	-16.48
早着：希望	-2.66	-3.40	-2.61	-3.12	-2.68	-8.44	-9.16	-9.38	-8.17	-8.48	-8.54	-8.89	-9.68	-9.57	-9.51	-10.14
初期尤度	-374.6	-525.2	-1000.9	-1147.4	-1298.3	-2622.5	-2862.8	-3164.0	-3514.3	-3838.2	-3886.9	-4184.7	-4738.6	-4892.0	-5003.0	-5202.4
最終尤度	-294.4	-445.5	-843.6	-990.0	-1137.4	-2299.8	-2515.2	-2772.6	-3162.1	-3440.0	-3483.3	-3742.2	-4307.2	-4451.8	-4548.2	-4727.9
尤度比	0.214	0.152	0.157	0.137	0.124	0.123	0.121	0.124	0.100	0.104	0.104	0.106	0.091	0.090	0.091	0.091
自由度調整尤度比	0.213	0.151	0.157	0.137	0.124	0.123	0.121	0.124	0.100	0.104	0.104	0.106	0.091	0.090	0.091	0.091

注1：「駅名」はパラメータ推定に用いたサンプル通勤者の利用する駅の中で最大の平均運行時隔の駅を指す。
 注2：駅名の項目中、()内は複数の入口・時刻で調査を行った駅でのそれぞれ入口名及び時刻を示す。

サンプルに含まれる最大平均運行時隔(秒)

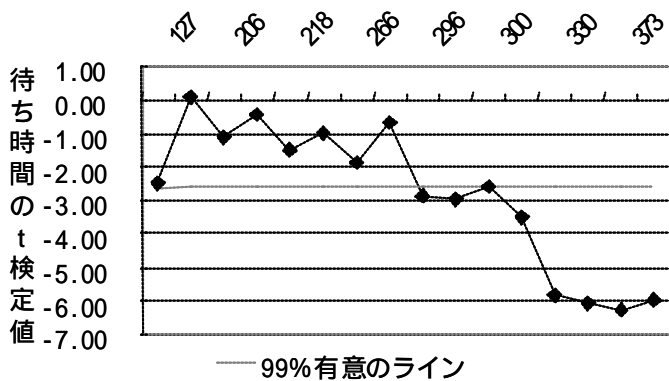


図-1：待ち時間の t 検定値の推移

秒(296秒)以上の駅が含まれる場合、 a が統計的に有意となり、待ち時間が意識されるようになっていくことが分かる。

以上の結果から、通勤交通行動において、待ち時間が意識されるか否かの限界は平均運行時隔で約4分30秒~4分56秒の間であると言える。この値は、利用者が待ち時間を意識することなく、駅へランダムに到着する場合の期待待ち時間が約2分20秒程度であることを意味する。なおこの結果は、家田ら¹⁾の研究によって求められた時間弁別閾値の推定結果よりかなり短い。これは、家田らの研究では、通勤者にスケジュール変動に対する費用は発生しないと仮定されているため、実際にはある列車に乗り遅れた通勤者であったとしても、見かけ上次の列車に向けてかなり早く駅に到着したと観測されてしまい、結果時間弁別閾値が実際より長く推定されてしまうことなどが原因であると考えられる。

本研究では、鉄道通勤利用者の自宅出発時刻選択行動を、駅での到着時刻観測データと、同時に実施したアンケート調査による通勤者の外生的時刻制約条件のデータとを用いて分析した。通勤者が列車待ち時間を意識しているか否かを列車待ち時間のパラメータの統計的な有意性から判定した結果、駅における平均列車運行時隔が4分30秒~4分56秒程度が待ち時間意識限界であることが分かった。

なお推定結果においては、一部パラメータが整合的ではない部分があるが、この原因の1つは、最終不遅刻列車時刻と乗車希望列車時刻とに対するスケジュール遅延費用が説明変数間で相関を持ってしまうことであると考えられる。このことを鑑み、両時刻が一致するサンプルについては最終不遅刻列車スケジュール遅延費用のみを説明変数として推定を試みた。だが、推定結果はほとんど改善されなかった。なお本研究では、連続する時刻を30秒毎の時刻帯に離散化した上で選択肢としており、その過程で、選択肢間の相関が生じた可能性がある。したがって、選択肢間の相関に対する制約を緩和するようなモデルを用いることで、より精度の高い分析をすることが今後の課題と考えられる。

参考文献

- 1) 家田仁, 後藤貞二, 松本嘉司, 島崎敏一: 通勤者における消費時間弁別閾の確率的評価, 土木学会論文集, 第383号/ -7, pp.73-81, 1987.
- 2) 大山正, 今井省吾, 和気典二編: 新編 感覚・心理学ハンドブック, 誠信書房, pp.19-21, 1994.