

# 都市鉄道の時刻別需要予測手法に関する研究\*

## Analysis and Modeling of Commuters' Departure Time in Urban Railway Network\*

原田知可子\*\*・岩倉成志\*\*\*・森地茂\*\*\*\*

By Chikako HARADA\*\*・Seiji IWAKURA\*\*\*・Shigeru MORICHI\*\*\*\*

### 1. はじめに

東京圏の都市鉄道は、ピーク時の非常に高い混雑率に加えて、列車速度の低下という相乗的なサービス悪化が問題となっている。輸送力の増強によるサービス改善が必要であるが、国・自治体の財源不足や鉄道会社の減益のため改良が遅れている。このため、供給側の対策のみでの混雑緩和は困難であり、需要側の利用時間の分散が必要と言える。

需要分散策としては、フレックスタイム制度(以下、FT)等による始業時刻の分散化や、ピークロードプライシング(以下、PLP)が期待されている。また、総合規制改革会議の2001年答申では通勤鉄道の「時間差料金制」の導入検討が示されている。

こうした政策による需要変動を事前に分析するためには、時刻別の需要予測手法の開発が必要であるが、都市鉄道を対象としたこの種の既存の研究は極めて少ない。

道路交通を対象とした時間帯別の需要予測手法に関する研究には数多くの蓄積がある一方で、都市鉄道を対象とした時刻別需要予測手法全体を検討した既往研究としては、家田ら<sup>1)</sup>の研究がみられる程度である。この論文では、多様な変数を分析し、10分毎の18肢選択によるロジットモデルを構築している。しかし、筆者らの問題意識を照らせば、運行本数の増加が要因となる列車速度の低下と需要への影響が分析できないことや、PLPの評価をすることができ

ないこと、個人によって異なる選択肢集合の予測手法が示されていない、といった課題がある。また、清水・屋井(1998)<sup>2)</sup>や藤原ほか(2000)<sup>3)</sup>で既に指摘されている選択肢間の類似性については検討されていない。藤原ほか(2000)ではPCL(Paired Combinatorial Logit)モデルを用いて出発時刻選択肢間のIIA特性の実証分析がなされ、類似性問題への対応の必要性が指摘されている。

以上の背景から、本研究は、ピーク時の列車遅延を考慮した都市鉄道の需要予測手法を検討することを目的としている。また、実務での利用のしやすさから、極力、既往技術を組み合わせた簡便なモデル開発を念頭においた。

### 2. 出発時刻選択モデル

#### (1) データ概要

本節で用いる需要データは、2000年11月に行ったWeb調査である。(株)アサツーディケイのインターネット調査システムKNOTSのモニターを対象に調査を行った。調査票のうち出発時刻選択モデルに関連する項目として、始業時刻やフレックスタイム制度適用などの就業形態、1日の活動スケジュール、通勤経路、PLPが実施された際の出発時刻の変更意向、個人属性の設問を用意した。

本調査では、神奈川県在住の東海道本線沿線の通勤通学者221サンプルを得ているが、鉄道乗車時刻等の未回答など本分析に不適切なサンプルを除いた114サンプルの通勤者を抽出した。このサンプルは、男女比が6:4、平均年齢が35歳である。業務形態は、固定出勤制適用者が多く、フレックス制は2割弱であった。また、通勤者の出発時刻は、6:00~9:59の間に最初の鉄道に乗車し、東海道線の最混雑時間帯(川崎-品川間、7:50~8:50)に大半が乗車しており、少ないサンプルではあるが、都市交通年報の最混雑時間帯と整合している。

\*キーワード：TDM，交通行動分析，公共交通運用

\*\*学生員，芝浦工業大学大学院建設工学専攻

\*\*\*正員，工博，芝浦工業大学工学部土木工学科

(〒108-8548 東京都港区芝浦3-9-14，

TEL03-5476-3049，FAX03-5476-3166)

\*\*\*\*正員，工博，東京大学大学院社会基盤工学専攻

表 1 . 出発時刻選択モデルの推定結果

	Logit モデル			Probit モデル	
	RP	SP	RP+SP	RP	SP
TE(分)	-5.366 (-5.99)	-3.352 (-4.79)	-5.397 (-6.11)	-3.984 (-6.23)	-2.560 (-4.98)
LHT×CON(分・%)	-1.729 (-1.35)	-1.358 (-1.16)	-1.877 (-1.74)	-1.327 (-1.35)	-1.086 (-1.19)
PLP(円/回)		-0.462 (-1.77)	-0.768 (-1.79)		-0.379 (-1.92)
RP 7:30	3.268 ( 3.24)		3.328 ( 3.44)	2.455 ( 3.31)	
RP 7:00,8:00	3.050 ( 3.35)		3.096 ( 3.50)	2.296 ( 3.44)	
RP 6:30,8:30	2.446 ( 3.07)		2.469 ( 3.14)	1.924 ( 3.21)	
SP 7:30		2.712 ( 3.19)	4.301 ( 2.99)		2.169 ( 3.36)
SP 7:00,8:00		2.114 ( 2.76)	3.359 ( 2.63)		1.695 ( 2.92)
SP 6:30,8:30		1.833 ( 2.80)	2.937 ( 2.54)		1.505 ( 3.00)
スケールパラメータ $\mu$			0.614 ( 3.91)		
共分散パラメータ $\theta_A$				1.37E-05 ( 0.03)	1.83E-06 ( 0.02)
初期尤度	-119.989	-114.286	-234.275	-120.702	-113.266
最終尤度	-81.176	-92.866	-174.066	-80.985	-89.903
調整済み尤度比 $\rho^2$	0.309	0.177	0.250	0.312	0.193
サンプル数 N	114	109	223	114	109

TE, LHT×CON, PLP の変数は, 100で割っている。 ( )はt値。

次にLOSデータは, 上記の被験者の通勤利用経路に基づき, 時刻表(東京時刻表2000年10月, 弘済出版社)によって, 出発時刻6:00~9:59までの30分ごとの所要時間データ(乗り換え時間も含む)を, 平成7年大都市交通センサスデータと用いて, 30分ごとの駅間混雑率データを作成した。

### (2) Logitモデルによる出発時刻選択モデルの構築

出発時刻6:00~9:59までを30分毎に区切り, 式(2.1)に示す8肢選択の非集計ロジットモデルを構築する。効用関数には早着時間(TE), 所要時間(LHT), 混雑率(CON), 時刻別の課金額(PLP)を変数に用いた。式(2.2)の $V_{in}^{RP}$ は実行動データから得られる個人 $n$ , 出発時刻 $t$ の効用関数である。式(2.3)の $V_{in}^{SP}$ は選好意識データによる効用関数で, PLPなどの現存しない政策変数を取り込んだモデルを構築する。

次に, 実行動データから得られる信頼性の高いRPモデルと現存しない政策を組み込めるSPモデルとを統合するRP/SP融合モデルを構築する。この方法は森川ら(1992)<sup>4)</sup>で提案され, 式(2.4)に示す尤度関数の第2項のスケールパラメータ $\mu$ によってSPモデルの誤差分散をRPモデルと整合させ, パラメータを推定する。

$$P_{in} = e^{V_{in}} / \sum_{j \in A_n} e^{V_{jn}} \quad (2.1)$$

$$V_{in}^{RP} = \alpha TE_{in} + \beta (LHT_{in} \times CON_{in}) \quad (2.2)$$

$$V_{in}^{SP} = \alpha TE_{in} + \beta (LHT_{in} \times CON_{in}) + \gamma PLP_{in} \quad (2.3)$$

$$L^{RP+SP}(\alpha, \beta, \gamma, \mu) = L^{RP}(\alpha, \beta) + L^{SP}(\alpha, \beta, \gamma, \mu) \quad (2.4)$$

表1に各モデルの推定結果を示す。表1より全てのモデルに関して早着時刻のt値が高く説明力がある。RPモデルでは尤度比が0.3以上であり, この種のモデルとしては非常に説明力が高い。またSPモデルの(所要時間×混雑率)のパラメータの説明力は低い。この理由として, PLPを設定しても, 混雑率が現在と変わらないと仮定して質問していることや, PLPと早着時刻により出発時刻を選択していることが考えられる。RP/SPモデルは, 尤度比も良好でRP, SP両モデルと比較してパラメータも有意になっている。

### (3) 時刻間の類似性に関する検討

本研究では上述したように, Probitモデルによって30分ごとの選択肢設定において類似性問題について対応が必要かどうかを検討する。

Probitモデルの分散共分散行列 $\Sigma$ は式(2.5)で表される。式(2.6)は, 本研究で用いたProbitモデルの共分散構造である。推定にはGHK法を用い, 乱数の発生回数は100回である。

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11}^2 & & & & & & & & \\ \sigma_{21} & \sigma_{22}^2 & & & & & & & \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33}^2 & & & & & & \\ \sigma_{41} & \sigma_{42} & \sigma_{43} & \sigma_{44}^2 & & & & & \\ \sigma_{51} & \sigma_{52} & \sigma_{53} & \sigma_{54} & \sigma_{55}^2 & & & & \\ \sigma_{61} & \sigma_{62} & \sigma_{63} & \sigma_{64} & \sigma_{65} & \sigma_{66}^2 & & & \\ \sigma_{71} & \sigma_{72} & \sigma_{73} & \sigma_{74} & \sigma_{75} & \sigma_{76} & \sigma_{77}^2 & & \\ \sigma_{81} & \sigma_{82} & \sigma_{83} & \sigma_{84} & \sigma_{85} & \sigma_{86} & \sigma_{87} & \sigma_{88}^2 \end{pmatrix} \quad \text{symmetric} \quad (2.5)$$

$$\Sigma = \begin{pmatrix} 1 & & & & & & & & \\ \theta_A & 1 & & & & & & & \\ 0 & \theta_A & 1 & & & & & & \\ 0 & 0 & \theta_A & 1 & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \theta_A & 1 & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_A & 1 & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_A & 1 & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \theta_A & 1 \end{pmatrix} \quad \text{symmetric} \quad (2.6)$$

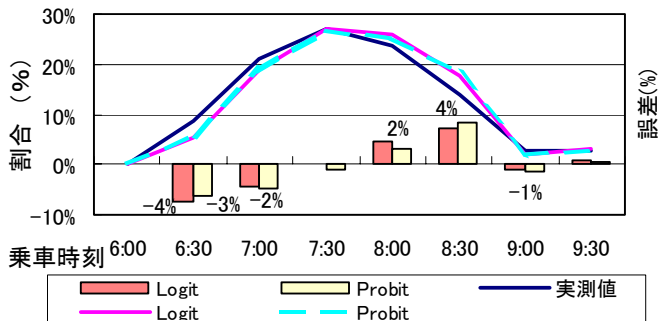


図1 . RPモデルの現況再現精度

表2 . 8:00の(所要時間×混雑率)を変化させたときの感度

	現況	10%減		20%減	
		Logit	Probit	Logit	Probit
6:00	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
6:30	8.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
7:00	21.1%	▲ 0.1%	▲ 0.1%	▲ 0.2%	▲ 0.6%
7:30	27.2%	▲ 0.7%	▲ 0.7%	▲ 1.4%	▲ 2.1%
8:00	23.7%	△ 1.5%	△ 1.6%	△ 3.1%	△ 4.9%
8:30	14.0%	▲ 0.6%	▲ 0.6%	▲ 1.3%	▲ 1.9%
9:00	2.6%	0.0%	0.0%	▲ 0.1%	▲ 0.2%
9:30	2.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

推定結果を、表1に示す。Logitモデルと同様に、  
 早着時刻のt値が高く、RPモデルの尤度比が0.3以上  
 である。また、若干ではあるが、Logitモデルの  
 t値、尤度比と比べて高めに推計された。しかし、  
 共分散パラメータについては、RP、SPモデルとも、  
 低い。これより時刻選択の選択肢間の類似性につ  
 いては、今回は考慮する必要がないという結果が得  
 られた。

また、図1は実測値と各RPモデルの現況再現の  
 精度を示したものである。この図より、Logitモデ  
 ル、Probitモデルともに、最大誤差4%と同等な精度  
 で推定されている。

表2にRPモデルで8:00台の(所要時間×混雑率)を  
 変化させたときのパラメータの感度分析を示す。  
 8:00台を20%減少させた場合では、Logitでは3.1%の  
 減少に対し、Probitは4.9%と変動が大きい。パラメ  
 ータ間のトレードオフ比の関係で、Probitの方が選  
 択確率の変化が大きい結果となっている。

### 3. 出発時刻選択肢集合の選別モデル

#### (1) 選択肢集合選別モデルの定式化

選択肢集合の取り扱いについて森川ら(1991)<sup>5)</sup>は、  
 確率的に変動するものとしてモデルを提案し構築し  
 ている。

本研究での出発時刻の選択肢集合とは、個人nが  
 出発可能な時間帯のことで、最も遅く出発する時刻  
 ( $maxTD_n$ )と最も早い時刻( $minTD_n$ )で表す。両者を

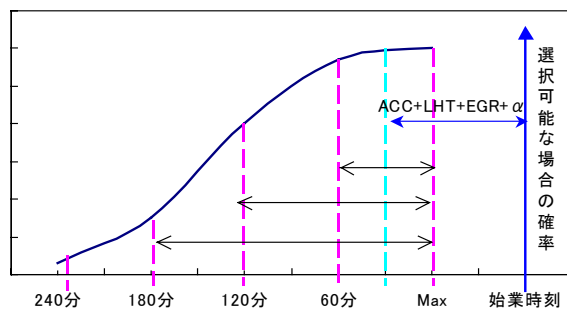


図2 選別モデルの考え方

表3 . 選別モデルのパラメータ推定結果

$\eta$	-1.945	(-7.31)
$\xi_{7:00}$	0.365	(-1.20)
$\xi_{8:00}$	0.609	(-3.80)
$\xi_{9:00}$	0.954	(-3.96)
$\xi_{ワークス}$	1.325	(-6.42)
初期尤度	-158.038	
最終尤度	-126.603	
尤度比	0.199	
サンプル数	114	

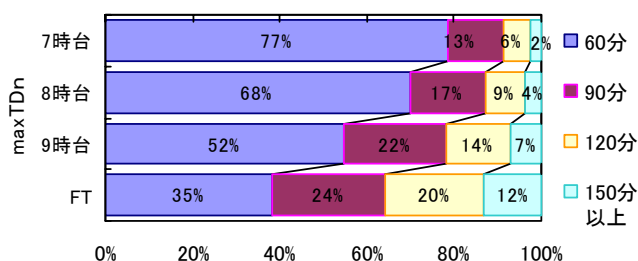


図3 選択可能な時間幅の割合

モデル化することで選択肢集合を推定できる。  
 $maxTD_n$ は始業時刻( $TWS_n$ )から通勤時間  
 ( $ACC + LHT + EGR$ )を引いて得られる。 $minTD_n$ は、  
 $maxTD_n$ から選択可能幅 $Z_k$ を引いて得られる。なお、  
 $Z_k$ は式(3.4)に示す様に、確率的に変化すると考え  
 た(図2)。 $\xi_m$ は、 $maxTD_n$ の時刻カテゴリーのパ  
 ラメータである。

$$A_n = f(maxTD_n, minTD_n) \quad (3.1)$$

$$maxTD_n = \{TWS_n - (ACC + LHT + EGR)\} \quad (3.2)$$

$$minTD_n = (MaxTD_n - Z_k) \quad (3.3)$$

$$R_n(z_k) = \left\{ \frac{1}{1 + \exp(\eta(z_k - \xi_m))} - \frac{1}{1 + \exp(\eta(z_{k-1} - \xi_m))} \right\} \quad (3.4)$$

$\eta, \xi$ ; パラメータ  $t$ : 乗車時刻  $k$ : 選択可能時間帯のカテゴリー

#### (2) データ概要

本モデルに用いたデータは出発時刻選択モデルと  
 同様に、2000年11月に行ったWeb調査である。もっ  
 と早くできる乗車時刻( $minTD_n$ )と、もっとも遅く  
 できる乗車時刻( $maxTD_n$ )の回答を得た。

#### (3) パラメータ推定結果

表3にパラメータの推定結果をしめす。モデル  
 全体の精度も高く、各パラメータのt値も有意であ

ることがわかる。

図3に固定始業時刻適用者の最遅出発時刻別/フレックス制適用者の選択可能幅の割合を示す。図3より早く出発する人ほど60分幅の割合が多く、選択可能な幅は小さい。始業時刻が遅くなるほど選択可能な時間幅が広がる傾向にあることがわかる。また、フレックス制の就業者は様々な時間幅をもっていることがわかる。この傾向は、アンケート結果とも整合している。

#### 4. 数値シミュレーション例

時刻別需要を下式に示す確率的利用者均衡配分によって推定する。混雑率を変数とする最適化計算を行った(式(4.1))。まず式(4.2)はLogitモデルによる出発時刻選択モデル、式(4.3)に出発時刻選択肢集合の選別モデル、式(4.4)は、本研究室で開発した<sup>6)</sup>列車の運行本数によって変動するリンクコスト関数である。前節までで、推定した各モデルを用いて、図4に示すある住居地(O)からリンク(a1, a2)を利用して、ある勤務地(D1, D2)へ通勤するという仮想都市を設定してシミュレーションを行った。FTが1割から3割に増加したとき、図5に示すように、7:30, 8:00の混雑率の割合が46%減少している。また、PLPの課金を行ったとき、図6に示すように7:30の需要が減少し、平準化している。そして、これらを同時に用いる時(図7)、7:30で61%、8:00で51%減少し、混雑率150%以下を達成している。

$$\min_{\omega_{at}} \left\{ C_{at} \times \omega_{at} (V_{at} \times C_{at}) - \sum_{ij} Q_{ij} \times P_{ij} \times \delta_{ijt}^a \right\} \quad (4.1)$$

$$P_{ijt} = f \left( \alpha x, \beta \sum_a \left\{ \omega_{at} (V_{at} \cdot C_{at}) \cdot LHT_{at}(C_{at}) \cdot \delta_{ijt}^a \right\} \right) (t \in A_n) \quad (4.2)$$

$$A_n = (\max TD_n, \min TD_n) \quad (4.3)$$

$$LHT_{at}(C_{at}) = t_{am} \left\{ 1 + \lambda (C_{at} / C_{am})^\rho \right\} \quad (4.4)$$

$C_{at}$ : 輸送力  $\omega_{at}(V_{at}, C_{at})$ : 混雑率  $Q_{ij}$ :  $i, j$ 間OD交通量

$\delta_{ijt}^a$ : リンクダミー

#### 5. まとめ

本研究は都市鉄道の時刻別需要予測の手法を示し、そしてPLP, FT施策のシミュレーション事例を示した。今回のProbitモデルでは、選択肢間の類似性を考慮する必要がない結果となった。今後、15分ピッチのモデルの構築を予定しているが、この場合のProbitモデルなどの非IIAモデルを適用する必要性があるか否かを検討したい。

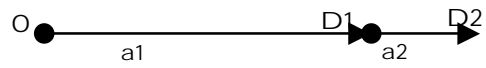


図4 シミュレーションに用いた仮想都市

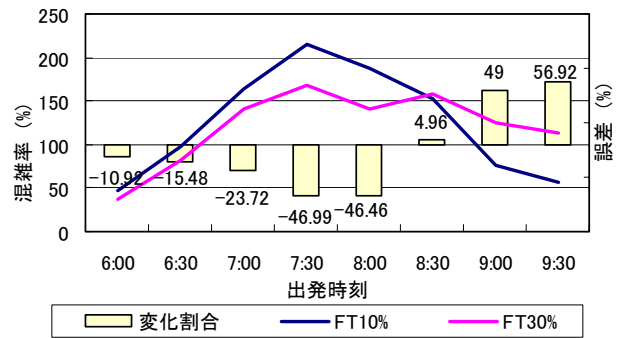


図5 フレックスタイム制の増加による変化

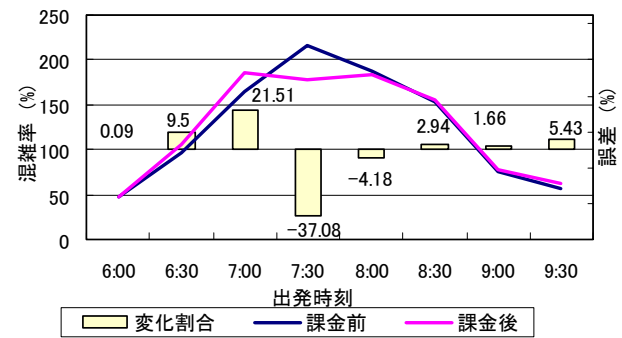


図6 ピークロードプライシングによる変化

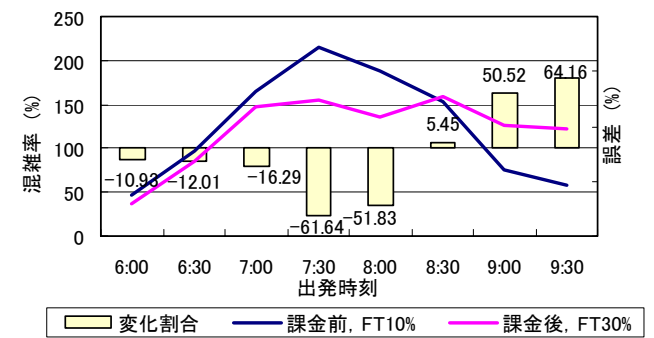


図7 フレックスとピークロードプライシングを同時に用いた時の変化

#### 参考文献:

- 1) 家田仁, 土谷和之, ファン レ ビン, 岡村敏之: 大都市圏鉄道需要の時刻集中特性予測モデルの構築と首都圏鉄道ネットワークへの適用, 土木学会論文集, No. 702/ -55, pp65-79, 2002.
- 2) 清水哲夫, 屋井鉄雄, : 所要時間の収束を考慮した時間帯別交通量分布, 土木計画学研究・講演集, No. 21, pp. 769-770, 1998
- 3) 藤原章正, 神田佑亮, 杉恵頼寧, 岡村敏之; 時刻選択モデルの選択肢区分が選択肢間の類似性及び不均一性に及ぼす影響, 土木計画学研究・論文集, No. 17, pp. 599-604, 2000
- 4) 森川高行[1992]; RPデータとSPデータを同時に用いた非集計行動モデルの推定法, 交通工学, Vol. 27, No. 4, pp21-30
- 5) 森川高行, 竹内博史, 加古裕二郎: 定量的観光魅力度と選択肢集合の不確実性を考慮した観光目的地選択分析, 土木計画学研究・論文集, No. 9, pp. 117-124, 1991
- 6) 岩倉成志, 渡辺将一郎, 土居厚司: 都市鉄道の時刻別需要予測のためのリンクコスト関数の開発 - 小田急小田原線を例に -, 土木計画学研究・論文集, No. 17, pp. 709-714, 2000