

首都圏における鉄道利用者の出発時刻選択モデル： 混雑の影響を考慮した路線別実証分析

菊池 恵和¹・福田 大輔²

¹学生会員 東京工業大学大学院修士課程 理工学研究科土木工学専攻

(〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1-M-11) E-mail:y.kikuchi@plan.cv.titech.ac.jp

²正会員 東京工業大学大学院准教授 理工学研究科土木工学専攻

(〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1-M-11) E-mail:fukuda@plan.cv.titech.ac.jp

東京都市圏の通勤時間帯混雑は依然激しく、鉄道事業者は線路増強工事などの施策を通じて混雑率改善に努めているが、未だ混雑率が180%以上の路線がいくつも存在している。ハード的な施策の限界を考えたとき、需要の時間分散策は実効性の高い施策の1つとして期待されるが、施策の効果を評価するためには鉄道通勤者の出発時刻選択行動を適切にモデル化する必要がある。本研究では最新の大都市交通センサスデータを用いて、路線毎に距離と出発・到着時刻の各回帰分析を行い、トリップ長と時刻選択行動の関係性を把握する。その上で、利用者の異なる構造の出発時刻選択モデルを推定・比較し、路線別の特性を明らかにすることを目的とする。

Key Words : Urban railway, Congestion, Departure time choice model, Cross Nested Logit model

1. はじめに

(1) 背景と研究の目的

首都圏では都市鉄道の混雑が非常に高く、幾通りもの混雑対策が実施されている。その具体例として、新線の建設、線路増強工事、信号システムの改修による本数の増発、車内定員が増加した新型車両の導入などが挙げられる。このような混雑対策が行われているにもかかわらず、図-1に示す通り、中央・総武線各駅停車や東京メトロ東西線等の路線では未だに混雑率が200%近くで高い状態にある。首都圏人口は2050年までは現状維持に近い状態が続くことが予想されているため、更なる対策が必要と言える。しかしながら、費用及び土地の制約による限界が生じているため、従来行ってきたハード面による対策ではない新しい対策を行う必要がある。

ソフト面における対策の例としては、利用者の通勤時刻分散を呼びかける施策が挙げられる。この場合、通勤先となる企業側で行えることとして、フレックスタイムの様な勤務体系を推進することが挙げられる。一方、鉄道事業者側では、東急田園都市線や東京メトロ東西線で行われている様にオフピーク時間帯の利用者に付加サービスを与えることや、ロンドンの地下鉄等で行われているようにピーク時間帯の料金を上げ、他の時間帯には料

金を下げるようなプライシング施策も考えられる。このような、時間分散施策による通勤需要の変化を予測・評価するには、適切な利用者の出発時刻選択モデルを構築することが必要である。さらに、近年では利用者の多様なスケジューリング選好特性を表現できる様々な形式の出発時刻選択モデルが提案されている。しかし、首都圏鉄道を利用する通勤者の行動は、高頻度かつ複雑なネットワーク上での意思決定を行い、さらに、列車遅延等の状況にも路線間で差異が大きいことから、それら外的要因の違いを考慮した出発時刻選択モデルの構築が必要である。

本研究では、まず出発時刻・到着時刻と利用者の距離の間における回帰分析を行う。その結果から、従来用いられてきたStep modelと、希望到着時刻と通勤距離の関係性を表すことができることから近年注目を浴びているSlope modelのうち、どちらが首都圏鉄道の通勤者の出発時刻選択モデルとして妥当であるのかを実証的に考察する。その後、首都圏の鉄道通勤利用者の出発時刻選択モデルを推定する。この時、特に以下の4点に焦点を絞った研究を行う。1つ目は、回帰分析で導入した利用者の行動を示しやすいSlope modelも含めて分析を行い利用者の行動を見ること、2つ目は路線間において出発時刻選択モデルの推定結果を比較することにより路線間の

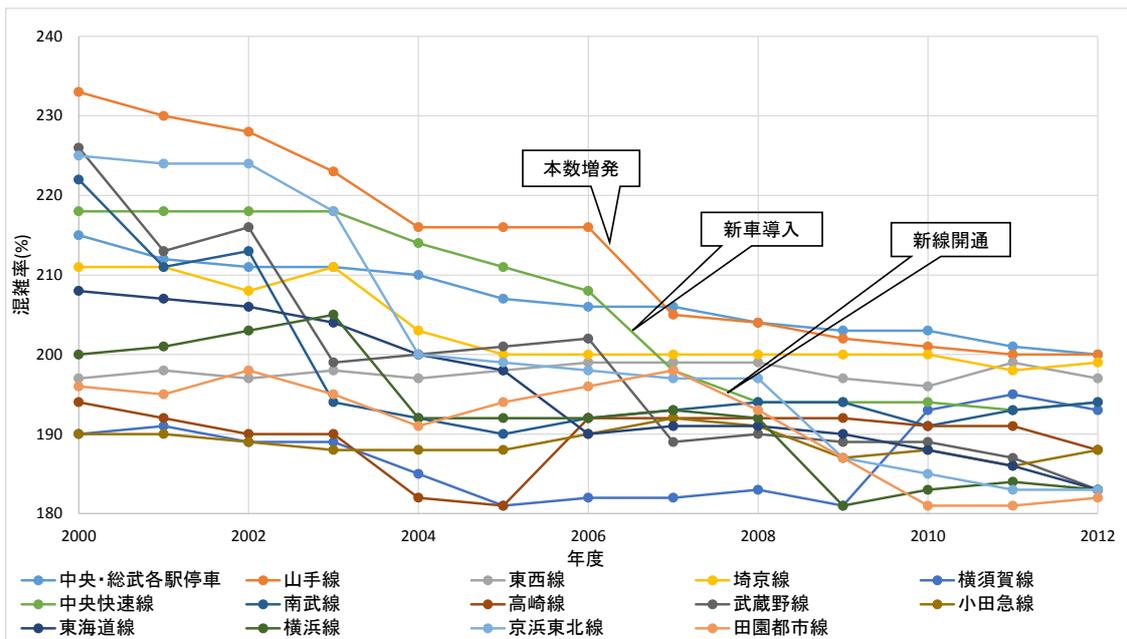


図-1 首都圏鉄道の混雑率の推移¹⁾

鉄道特性を把握することである。3つ目は、東京都市圏で未だに深刻である車内混雑の影響を考慮した出発時刻選択モデルの構築を行うことである。最後は離散選択モデルの誤差構造を精緻化することである。

以降の構成は、この後1章で引き続き既往研究の紹介を行う。2章で出発時刻選択の基礎分析を行い、路線ごと・距離ごとに通勤客の行動を比較する。3章では出発時刻・到着時刻と移動距離で回帰分析を行い、またその他の特性の結果を比較する。4章では出発時刻選択モデルのパラメータ推定を行い、結果をまとめる。最後に5章で結論を述べ、今後の課題についてまとめる。

(2) 既往研究の整理と本研究の位置づけ

出発時刻選択行動に関する研究は数多い。一般には、利用者の不効用を利用者の出発時刻 t_D と到着時刻 a の関数 $u(t_D, a)$ で示す。1つの具体例はVickrey(1969)²⁾が提案し、現在でも広く用いられる'Step model'である。この時 Step model による移動費用は図-2 の通り図示される。つまり、利用者の希望到着時刻 a^* に対し、予定到着時

刻より早く着いた時の限界不効用を $\beta \cdot$ 遅れた時は γ 、時間価値を α で表し、線形に足し合わせ定式化したものである。そのため、時間費用は式(1a)の通り定義される。

$$c(t_D, a) = \alpha(a - t_D) + \beta \min(0, a^* - a) + \gamma \min(0, a - a^*) \quad (1a)$$

一方、限界効用が時間により変化するモデルは'Slope model'と呼ばれ、Vickrey(1973)³⁾が提案したものであり、Fosgerau and Engelson(2011)⁴⁾により更なる研究が行われた。自宅滞在、会社滞在の限界効用 $H(t)$ 、 $W(t)$ を与え、最適出発時刻 t_D^* を $H(t_D^*) = W(a) = W(T + t_D)$ と設定(T : 総移動所要時間 $T = a - t_D$)する。本研究では限界効用を線形とし、式(1b)、式(1c)のように特定化する。

$$H(t) = \beta_0 + \beta_1 t \quad (1b)$$

$$W(t) = \gamma_0 + \gamma_1 t \quad (1c)$$

この時の移動費用は以下の式(1d)で表される。なお、式(1d)中の t^* は $H(t^*) = W(t^*)$ となる時刻を示している。

$$c(t_D, a) = \int_{t_D}^{t^*} H(t) dt + \int_{t^*}^a W(t) dt \quad (1d)$$

図-3 では Slope model によって導出される移動費用を

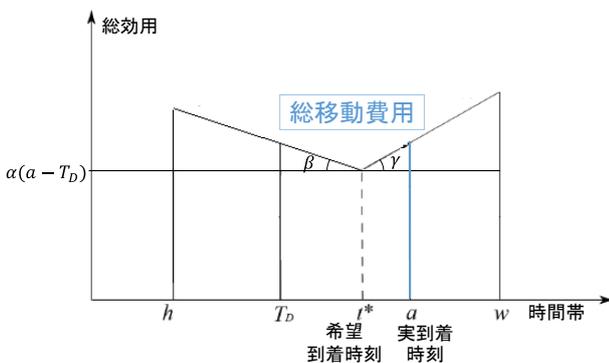


図-2 Step model による移動費用の表現

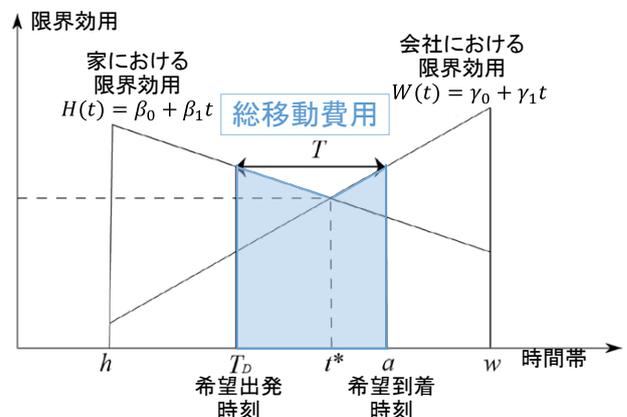


図-3 Slope model による移動費用の表現

表現する。この時、希望到着時刻 a^* は所要時間によって変化することが示される。

次に、混雑を考えた鉄道利用者の出発時刻選択の研究には、岩倉・原田(2005)⁹⁾が混雑率より得た混雑不効用を効用関数に含め出発時刻選択モデルのパラメータ推定を行った研究や、松村ら(2012)¹⁰⁾が構造推定を行う際に混雑を内生変数で示した研究がある。だが、推定は全て Step model を用いて行っており、Slope model を用いた研究は Xie and Fukuda(2014)⁷⁾を除いて存在しない。また、以上の研究は首都圏の 1 路線のみまたは複数の鉄道路線を同時に推定した研究であり、路線間の比較を行った研究はない。

隣接時間帯間での出発時刻の相関を考慮した研究には、岩倉・原田(2005)⁹⁾の Logit model と Probit model の比較を行った研究がある。だが、どの程度の時間間隔まで相関を考慮すべきか調査した研究は行われていない。

また、出発時刻・到着時刻と移動距離に関する回帰分析を行った研究には、Fosgerau・Engelson(2011)⁴⁾が存在する。しかしながら、性別や年齢等の他の要因との関係性や路線間との比較を行った研究とはなっておらず、どのモデルを通勤利用者の出発時刻選択行動に用いるべきかを考えた論文とはなっていない。

以上のことから、本研究ではまず大都市交通センサス(2010)⁸⁾のデータと Fosgerau ら(2011)のモデルを応用し、出発・到着時刻と距離に関する回帰分析を行う。この時、性別や年齢等の利用者特性が到着時刻に与える影響を考慮して考察を行う。その後、Xie(2014)のモデルを応用し、路線毎に効用パラメータを推定する。その際、混雑不効用変数の検討とランダム効用モデルの誤差構造の検討を併せて行う。

2. 通勤者の出発時刻選択行動の基礎分析

(1) 本研究で利用するデータセット

本研究では、2010年に出された大都市交通センサスを利用して推定を行う。このとき、対象とする路線は都心方向に向かい、都心部の1つの終点で多くの利用者が降りる(もしくはそれに近い)主要な放射状の路線とする。使用路線と各路線の概略を以下の表-1に示す。最大混雑率は平成25年度の国土交通省公表資料⁷⁾から引用した。

表-1 本研究で利用する路線

	東急田園都市線	東京メトロ東西線	西武池袋線	西武新宿線	京王線	小田急小田原線	東武東上線
運行区間	中央林間～渋谷	西船橋～中野	吾野～池袋	本川越～西武新宿	京王八王子～新宿	小田原～新宿	寄居～池袋
全長	31.5km	30.8km	57.8km	47.5km	37.9km	82.5km	75.0km
駅数	27	23	31	29	34	47	39
所要時間	67	56	92	78	90	132	116
最大混雑率	183	199	159	157	163	188	139

(2) 各路線における出発時刻分布

図-4・5は、東急田園都市線・小田急小田原線における乗車時刻分布である。路線毎に乗車時刻分布を比較すると、平均所要時間の増加と共に出発時刻のピークが早まることが分かる。国土交通省の調査結果⁸⁾でも、勤務開始時刻のフレックスタイム制が余り浸透していないため、多くの利用者が勤務開始時刻付近の列車に集中している。これは、通勤客が移動距離に応じて出発時刻を変えて対応していると言える。

一方、図-6・7は同一路線間での移動距離の長短による乗車時刻分布を示している。同一路線間の結果からも、都心部から遠い駅を出発し、移動距離が長い人ほど出発時刻が早いということが分かる。但し、東京メトロ東西線では小田急小田原線での結果ほど明らかな差にはなっていない。これは移動時間が比較的短いこと、混雑する区間も他の路線と比べると比較的短いと認められる。

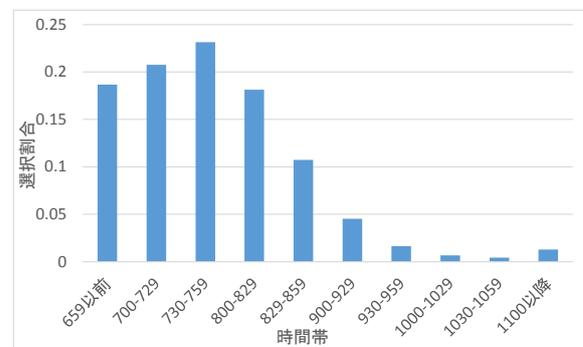


図4 東急田園都市線の乗車時刻分布
(平均乗車時間 22.58 分)

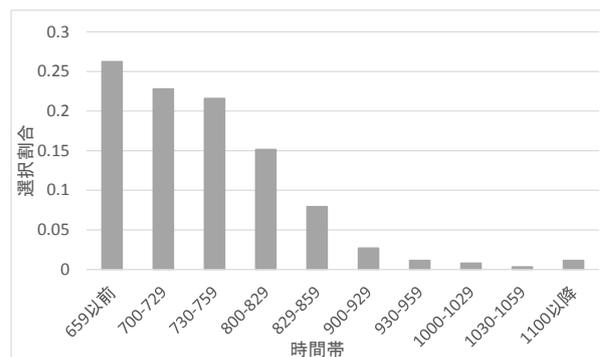


図5 小田急小田原線の乗車時刻分布
(平均乗車時間 41.71 分)

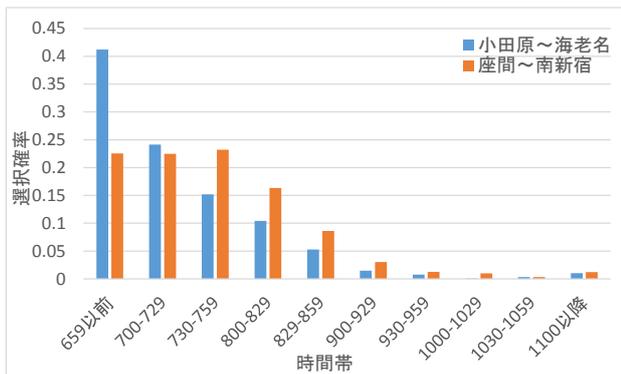


図-6 小田急小田原線の乗車駅別乗車時刻分布
(平均乗車時間 41.71 分)

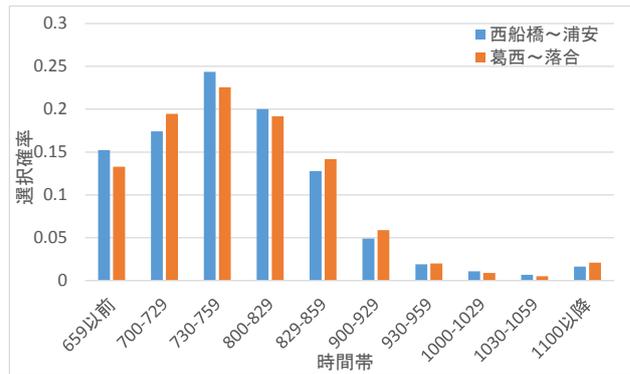


図-7 東京メトロ東西線の乗車駅別乗車時刻分布
(平均乗車時間 20.14 分)

3. 出発時刻・到着時刻選択行動の回帰分析

(1) 回帰分析のデータセットの構築

表-1で述べた路線について、通勤者の移動距離が到着時刻に影響しているのどうかを見て、利用者の出発時刻選択モデルとしてSlope modelを導入することが望ましいかどうかを調べるために、路線毎及びこれらのデータを一括して回帰分析を行う。以下はデータセットのクリーニングを行う条件である。

- 勤務開始時刻・乗車時刻・降車時刻・乗降駅・下車駅と目的地間の所要時間が明記
- 希望到着時刻は勤務開始時刻から下車駅と目的地間所要時間の差と定義し、希望到着時刻が 8 時～10 時の間のデータ
- 乗車・降車時刻が 5 時～12 時で完結するデータ
- 移動目的が「通勤」であるデータ

乗車時刻・降車時刻は希望到着時刻からの差を取り標準化し分析を行う。これは、通勤客の希望到着時刻と移動距離の散布図から無理やり希望到着時刻の回帰直線を作成し、その結果からStep modelとSlope modelのどちらが妥当か考えることが適切か不明瞭であるためである。

(2) 回帰分析モデルの構築

大都市交通センサスのデータの内、出発時刻選択行動

に影響する可能性がある以下のパラメータを回帰分析に導入する。

- 年齢
- 性別ダミー(女性を 1)
- 優等列車利用ダミー
所要時間に差があり、乗車時刻・降車時刻の差に影響が生じる可能性があるため
- 降車駅・目的地間の移動で車の利用有無ダミー
渋滞により時間信頼性が下がるので、早く着こうと行動する可能性があるため

推定する時に、乗車時刻・降車時刻は共に年齢は有意に影響をしなかったため、これは省略して分析を行った。また、優等列車を利用する可能性・イグレスで自動車を移動する可能性については、性別との交互作用項が生じている可能性があり、導入した場合も分析を行ったが、この結果も有意に働かなかった。従って、交互作用は働かないと考えて式(3a)の各定数の回帰分析を行った。

$$\text{時間} = \alpha + \beta \times \text{距離} + \gamma \times \text{性別ダミー} + \varepsilon \times \text{優等列車ダミー} + \delta \times \text{イグレス車ダミー} \quad (3a)$$

(3) 分析結果

表-2・3はそれぞれ乗車時刻・降車時刻に対して回帰分析を行った結果である。この結果は路線ごとに分けて掲載する。

表-2 乗車時刻に関する回帰分析結果

結果(t 値)	田園都市線	京王線	小田急線	西武池袋線	西武新宿線	東武東上線	地下鉄東西線
定数項	-0.536(-10.51)	-0.514(-13.08)	-0.631(-19.31)	-0.516(-9.16)	-0.535(-6.90)	-0.561(-13.30)	-0.800(-11.81)
距離(時間/km)	-0.038(-12.81)	-0.039(-18.25)	-0.026(-22.33)	-0.026(-8.69)	-0.026(-7.70)	-0.024(-13.45)	-0.020(-3.48)
性別	0.244(5.87)	0.121(3.54)	0.189(6.22)	0.143(2.87)	0.227(3.53)	0.154(3.98)	0.247(4.10)
列車種別	0.169(3.93)	0.162(4.59)	0.142(4.40)	0.107(1.74)	0.053(0.74)	0.062(1.44)	-0.130(-1.12)
イグレス車	-0.116(-1.87)	-0.068(-1.13)	-0.072(-1.57)	-0.268(-2.77)	-0.181(-1.72)	-0.124(-2.33)	-0.086(-0.65)
決定係数	0.348	0.387	0.379	0.236	0.206	0.298	0.090
調整済決定係数	0.342	0.383	0.376	0.227	0.196	0.294	0.780
サンプル数	462	626	1021	346	345	623	370

表-3 降車時刻に関する回帰分析結果

結果(t 値)	田園都市線	京王線	小田急線	西武池袋線	西武新宿線	東武東上線	地下鉄東西線
定数項	-0.471(-9.19)	-0.422(-10.69)	-0.499(-15.20)	-0.413(-7.53)	-0.383(-5.06)	-0.445(-10.73)	-0.668(-27.88)
距離(時間km)	-0.007(-2.40)	-0.027(-1.25)	-0.002(-1.53)	-0.004(-1.30)	-0.002(-0.64)	-0.002(-1.14)	0.008(-2.96)
性別	0.245(5.85)	0.122(3.58)	0.182(5.95)	0.133(2.75)	0.220(3.50)	0.134(3.53)	0.256(11.31)
列車種別	0.089(3.06)	0.042(1.17)	0.024(0.74)	0.074(1.24)	-0.043(-0.62)	-0.001(-0.018)	-0.102(-0.87)
イグレス車	-0.141(-2.26)	-0.114(-1.89)	-0.144(-3.13)	-0.311(-3.31)	-0.218(-2.13)	-0.164(-3.14)	-0.120(-0.90)
決定係数	0.108	0.032	0.049	0.060	0.052	0.040	0.051
調整済決定係数	0.100	0.026	0.045	0.049	0.040	0.034	0.038
サンプル数	462	626	1021	346	345	623	370

今までに利用したデータを全て統合した場合の散布図を図-8(出発時刻)・図-9(到着時刻)に記し、回帰分析した時の結果を表-4に記す。この結果から言えることは移動距離が増えても到着時刻が有意に変化するデータはほとんどなく、さらにその結果も非常に小さいことである。また、到着時刻については決定係数の値も0.01程度と非

表-4 全路線一括の回帰分析結果

結果(t 値)	乗車時刻	降車時刻
定数項	-0.634(-36.05)	-0.484(-27.88)
距離(時間km)	-0.026(-33.12)	-0.002(-2.96)
性別	0.199(11.98)	0.185(11.31)
列車種別	0.124(6.97)	0.038(2.17)
イグレス車	-0.104(-3.80)	-0.169(-6.27)
決定係数	0.295	0.051
調整済決定係数	0.294	0.050
サンプル数	3795	3795

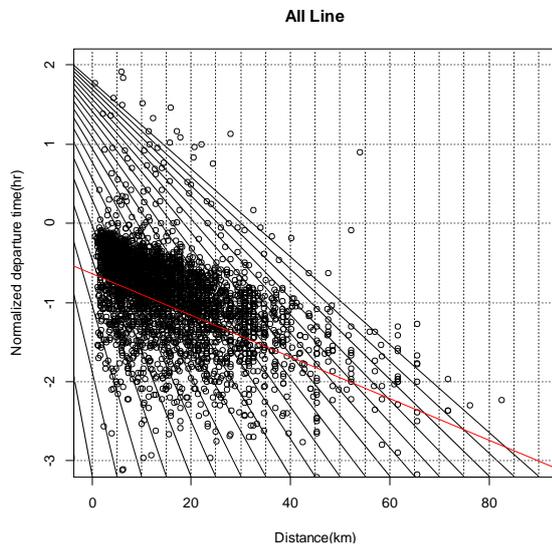


図-8 出発時刻・移動距離の散布図(全路線一括)

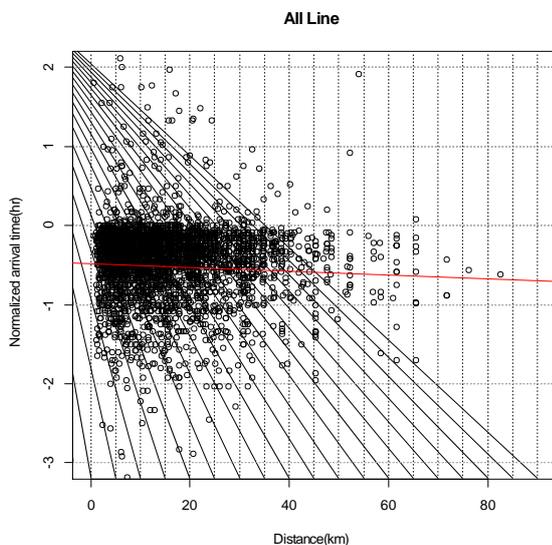


図-9 到着時刻・移動距離の散布図(全路線一括)

常に小さかった。このことから、到着時刻については移動距離との関係性はなく、一定であることが示唆される。従って、推定はSlope modelではなくStep modelを利用することが望ましいと言える。

距離以外に今回導入した項では、性別ダミーによる影響(女性による影響)が乗車・降車時刻共に正の値に有意であった。女性の方が利用する時間が遅いことを示しているため、家事を女性が主にやっていて勤務先に向かう時間が遅くなることを示唆しているのではないかと推察される。また、イグレス車ダミーが効いている場合は、有意に効かない路線もあるが、全体的に乗車時刻・降車時刻を早くする傾向があると言える。これは、自動車を利用する場合は渋滞等によりイグレス所要時間にはばらつきが生じる可能性があるためという、最初に導入を決めた根拠と一致していると言える。優等種別を利用した場合は所要時間が短縮されるため、乗車・降車時刻のパラメータは負の値を取ることが予想される。実際、東京メトロ東西線以外ではその結果の通りになった。東西線ではこのパラメータが有意に効いていないため、優等列車の影響は余りないものと考えられる。この原因として、東西線では朝のラッシュ時間帯には快速列車の代わりに停車駅が増えた通勤快速電車を導入して混雑の均等化を図っているため、所要時間に差が生じていないことが背景にあるのではないかと推察される。

更に、国土交通省交通政策審議会がまとめた遅延量が発生する頻度¹⁰によって2つにグループ分けした(グループ1: 週に1回以上の頻度で10分以上の遅延が発生…東急田園都市線・小田急小田原線・東京メトロ東西線・グ

ループ2: 1週間~2週間に一度の頻度で10分以上の遅延が発生…西武池袋線・西武新宿線・京王線・東武東上線)場合に、2つのグループの分析結果に差があるのかどうかを考察する。遅延頻度の大きい路線では同一距離でも遅延頻度の少ない路線より早い時間に列車へ乗車する可能性があると考えられる。しかし、実際は路線ごとにパラメータの値にそこまで大きな違いはなかった。これは、大都市交通センサスにおける各人のデータは(乗車時刻, 降車時刻)は既にある日の列車の運行データも考慮されており、既に遅延量等のデータが入っているためこのような結果になったのではないかと。

4. パラメータの推定

(1) 離散選択モデル

式(4a)はStep modeから、式(4b)はSlope modelから特定化を行った場合のランダム効用関数である。

$$u_{step}(a, CRI, \varepsilon) = \beta \min(0, a - a^*) + \gamma \min(0, a^* - a) + \theta CRI + \varepsilon \quad (4a)$$

$$u_{slope}(t_D, CRI, \varepsilon) = -\frac{(t_D + T)^2}{2} \gamma_1 + \frac{t_D^2}{2} \beta_1 - t_D(\gamma_0 - \beta_0) + \theta CRI + \varepsilon \quad (4b)$$

CRIは列車内混雑程度を移動費用とするための指標で、ある区間dの所要時間 τ_d 及び混雑率 cg_d を利用し、それを乗車した全区間に渡って足し合わせることで、式(4c)の通り求める。

$$CRI = \sum_d \tau_d (cg_d)^2 \quad (4c)$$

ここで、 ε は極値分布 $\varepsilon \sim EV(0, \mu)$ であり、ランダム効用理論を導入するために用いる。この時、利用者の出発時刻は7時8分~22分から15分毎に離散的に分割し、最後は9時38分~52分に出発すると設定し、全部で11分割にして計算を行う。

(2) 隣接する出発時間帯における相関構造

利用者の出発時刻において、隣接する時間帯同士の相関を調べるために通常、離散選択モデルを考察する場合によく用いる多項ロジットモデル(MNL)だけでなく、クロスネスティッドロジットモデル(CNL)も利用してどちらの構造が望ましいかどうか比較する。式(4d)はCNLで利用者が離散化した時間帯iに出発する確率を示す。また、図-10はこの時のモデルの模式図である。

$$p(i) = \frac{\sum_{j \in C} \alpha_{jm}^{\mu/\mu} e^{\mu_m v_i}}{\sum_{p=1}^M \left(\sum_{j \in C} \alpha_{jm}^{\mu/\mu} e^{\mu_m v_i} \right)^{\frac{\mu}{\mu_m}} \sum_{j \in C} \alpha_{jm}^{\mu/\mu} e^{\mu_m v_i}} \alpha_{jm}^{\mu/\mu} e^{\mu_m v_i} \quad (4d)$$

式(4d)中の入れ子同士の相関を表すスケールパラメータは全体を示す μ では $\mu = 1$ とし、各々の項を示す μ_m については全てのグループで同じ値を取るとする。アロケ

ーションパラメータ α は各出発時間帯においてどのグループに所属するかの割合を示し、今回アロケーションパラメータは同じ時間帯では全てのグループに等確率で帰属すると仮定する。

(3) データセット

パラメータ推定のデータセットには、回帰分析の時と同様にクリーニングを行う。但し、出発時刻については、7時8分~9時52分までと、回帰分析の場合と比べて短い時間帯をとることにする。CRIの算出では、大都市交通センサスの個票データから以下の手順により各区間・時間帯の混雑率を求める。その後各区間・時間帯ごとの・CRIを導出し、その後通勤者の利用する区間ごとに足し合わせて、各通勤者のCRIを導出する。

- ① 個票データから当該路線データ(乗車時間が明らかな1回目の移動での1経路目の路線のみ)を抜き出す。
- ② 各データの乗車時間と各駅間所要時間から、各駅間の通過時間を導出し、当該時間帯の駅間輸送量に拡大率を用いたときの人数を足し合わせる。
- ③ 各駅間の時間帯別利用者数を各駅間の輸送量データで割って混雑率を算出する。

図-11はこの方法により求めた各路線の混雑率の時間帯別の推移である。多くの路線では8時前後に混雑のピークを迎えたことが確認でき、これは利用者の通勤行動と同じ結果と言える。しかし、算定結果は国土交通省が発表している結果と比べ全体的に低い。この原因として、今回混雑率の推定に利用したセンサスのデータは1回目の移動の1路線目のみ利用しているため、過少集計された部分が多いと推察される。この他に、東急田園都

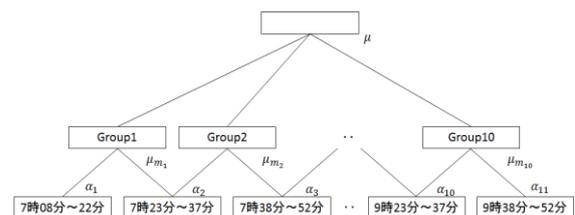


図-10 CNLを用いたモデルの模式図

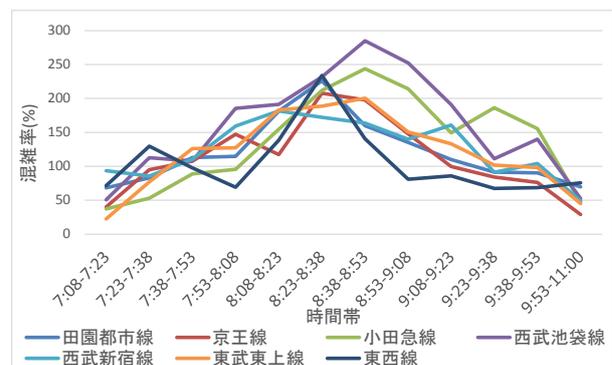


図-11 各路線最混雑区間の混雑率の時間帯別推移

市線や西武池袋線の個票データなど、一部の時間帯のみ混雑率が非常に高いケースが確認される。これは、大都市交通センサスを作成する際、一部のデータから拡大率を近似し作成するが、定期券と普通券の利用データからの拡大率算定方法が違うこと、また個票データから途中駅の通過時間を15分毎に分割して計算を行っているが、通過時間を完全に把握することが出来ず、1つ隣の時間帯にカウントされた事例も生じたためにこのような結果となったと推察される。

(4) 推定結果

大都市交通センサスのデータを用い、東京メトロ東西線でパラメータ推定を行った結果を表-5(Step model)と表-6(Slope model)にまとめる。なお、サンプル数は302個であった。Step modelの結果に χ^2 検定を行い、CNLの誤差構造の設定としてどの結果が一番望ましいか調べると、相関60分(1つのネストに最大4選択枝を含むようなCNL構造)が最も良い結果となった。しかし、Slope modelでは相関があると仮定し、MNLを用いた場合はスケールパラメータの値が1を超え矛盾が生じてし

表-5 東京メトロ東西線パラメータ推定結果(Step model)

結果(t値)	相関無し	相関30分	相関45分	相関60分
β	-1.67(-8.36)	-1.82(-7.11)	-2.00(-6.24)	-2.38(-5.27)
γ	9.55(8.82)	10.3(8.82)	11.3(6.19)	13.6(4.90)
θ	-0.016(-2.23)	-0.018(-2.23)	-0.020(-2.26)	-0.025(-2.33)
μ_m (t値 at 0)		0.635(2.18)	0.618(3.22)	0.523(3.57)
(t値 at 1)		(-1.26)	(-1.99)	(-3.26)
最終尤度	-519.697	-519.153	-518.582	-517.65
調整済決定係数	0.278	0.278	0.267	0.270

まったため、CNLを用いるべきではないことが判明した。そのため、他路線についてはStep modelの場合はCNLで相関60分間のモデル、Slope modelではMNLを個票データから作成したデータセットを用い推定を行った。

表-7は各路線にStep modelを利用して推定を行った結果、表-8はSlope modelを利用して推定を行った結果である。なお、東京メトロ東西線以外の路線については混雑パラメータが有意に働かない結果が多かったが、混雑パラメータの有無が他のパラメータに影響を及ぼしていないことと、混雑による影響を重視して考慮したいために混雑項を入れた結果を利用する。

Slope modelの推定結果を見ると、図-3で示したSlope modelの形式とは β_1 の絶対値が異なり、自宅に滞在する限界効用は遅くなればなるほど増加する結果となった。この場合だと、移動時間が変化した場合に、希望到着時刻が何時になるのかを推測することが出来ないので、回帰分析で得られた結論と同様に、Slope modelを利用することは望ましくないと言える。

また、Step modelに関してはスケールパラメータが路

表-6 東京メトロ東西線パラメータ推定結果(Slope model)

結果(t値)	相関無し	相関30分	相関45分	相関60分
$\gamma_0 - \beta_0$	-19.4(-3.79)	-19.3(-4.10)	-19.8(-4.40)	-19.6(-4.33)
$\beta_1 - \gamma_1$	-2.35(-3.86)	-2.35(8.82)	-2.4(-4.47)	-2.39(-4.40)
γ_1	0.83(1.43)	0.81(1.41)	0.76(1.33)	0.769(1.34)
θ	-0.011(-0.87)	-0.011(-0.94)	-0.012(-1.07)	-0.011(-1.01)
μ_m (t値 at 0)		1.36(1.76)	1.33(2.13)	1.22(1.79)
(t値 at 1)		(0.46)	(0.53)	(0.32)
最終尤度	-665.306	-665.196	-665.156	-665.250
調整済決定係数	0.076	0.062	0.064	0.065

表-7 パラメータ推定結果(Step model : CNLで相関60分)

結果(t値)	田園都市線	小田急線	京王線	西武池袋線	西武新宿線	東武東上線	東西線	全て一括
β	-2.55(-6.16)	-1.30(-6.60)	-1.87(-6.00)	-2.80(-5.90)	-1.98(-4.98)	-2.24(-6.55)	-2.38(-5.27)	-1.93(-15.67)
γ	14.7(6.11)	8.45(7.85)	10.6(6.44)	15.5(5.82)	8.48(5.07)	15.8(6.47)	13.6(4.90)	11.2(16.26)
θ	-0.014(-1.59)	-0.002(-0.18)	0.004(1.15)	-0.029(-0.75)	-0.005(-0.13)	0.011(2.33)	-0.025(-2.33)	-0.007(-0.63)
μ_m (t値 at 0)	0.455(4.01)	0.699(4.60)	0.656(4.08)	0.338(4.22)	0.571(3.1)	0.4135(5.07)	0.523(3.57)	0.538(10.73)
(t値 at 1)	(-4.80)	(-1.98)	(-2.14)	(-8.26)	(-2.33)	(7.15)	(-3.26)	(-9.23)
最終尤度	-590.103	-1406.18	-898.730	-503.729	-471.218	-811.513	-517.65	-5307.05
調整済決定係数	0.278	0.269	0.306	0.294	0.279	0.319	0.270	0.295
サンプル数	357	809	577	304	279	504	304	3132

表-8 パラメータ推定結果(Slope model : MNL)

結果(t値)	田園都市線	小田急線	京王線	西武池袋線	西武新宿線	東武東上線	東西線	全て一括
$\gamma_0 - \beta_0$	-14.7(-5.25)	-10.5(-6.32)	-14.0(-6.30)	-14.1(-4.39)	-14.7(-4.72)	-10.3(-4.24)	-19.4(-3.79)	-13.5(-15.62)
$\beta_1 - \gamma_1$	-1.73(-5.22)	-1.30(-6.50)	-1.69(-6.35)	-1.69(4.43)	-1.74(-4.71)	-1.23(-4.25)	-2.35(-3.86)	-1.62(-15.8)
γ_1	2.21(5.10)	1.82(6.81)	1.82(6.81)	2.37(4.53)	2.35(4.59)	2.83(6.76)	0.83(1.43)	1.98(14.34)
θ	0.004(0.77)	0.004(3.68)	0.007(2.53)	0.004(1.74)	0.004(1.58)	0.016(5.99)	-0.011(-0.87)	0.004(5.57)
最終尤度	-780.946	-1717.55	-1162.96	-651.015	-589.212	-1035.78	-665.306	-6731.72
調整済決定係数	0.083	0.113	0.110	0.101	0.113	0.140	0.076	0.107
サンプル数	357	809	577	304	279	504	304	3132

線毎に異なっているため、値の大小を直接比較するのではなく、希望到着時刻の前後におけるパラメータの値を比較することにする。その結果を表-9に記す。この結果から言えることは、路線毎に値の比は大きく異なっていることである。但し、回帰分析で行った時と同様に、遅延頻度の大小でグループ分けを行って考察を行ったとしても、結果が適切なものにならなかった。また、遅延頻度の大小については、他のパラメータにおいても大きな影響は余り及ぼしていなかった。その為、遅延頻度の大小は通勤客の出発時刻選択行動に対して、そこまで大きな影響は及ぼされていないということが示唆された。

また、混雑による影響の項は有意でない結果を含めても、東京メトロ東西線以外では正の値を取っており、混雑している列車を好んで乗車する傾向があることがあった。このことは、東武東上線や西武新宿線のように比較的混雑率が低い路線では、希望到着時刻付近につける列車を好む一方、東急田園都市線や小田急小田原線のように若干列車が混んでいたとしても希望到着時間付近に到着できる列車を好んで乗車していることを示唆している。一方、国土交通省の出している混雑率データによると他の6路線と比べて非常に高い混雑率である東京メトロ東西線では、希望到着時間から離れたと思うほど混雑が激しいということを示唆している。

但し、混雑の項は有意にならない場合が多かったため、CRIの導出方法に課題があり、その結果により利用者の行動が変わる可能性があることも示唆された。

5. 結論と今後の課題

本研究では、まず出発時刻・到着時刻と利用者の距離の間における回帰分析を行った。その後、首都圏の鉄道通勤利用者の出発時刻選択モデルのパラメータを推定し、首都圏鉄道を利用する通勤者の出発時刻選択行動を適切に示せるモデルは何かとすることを考察した。その結果、回帰分析・パラメータ推定共に Slope model では表現しきれない部分があったため、Step model を用いることが望ましいことが明らかになった。Step model におけ

表-9 Step model での希望到着時刻前後のパラメータ比

路線名	$-\gamma/\beta$
東急田園都市線	5.76
小田急小田原線	6.50
京王線	5.67
西武池袋線	5.54
西武新宿線	4.28
東武東上線	7.05
東京メトロ東西線	6.20
全線一括	5.80

る路線間での早着・遅着による不効用の比は有意に大きく、路線間ごとに出発時刻選択モデルは異なることが確認出来た。しかしながら、遅延度の大小が出発時刻行動に与える影響については大きくないことが確認された。車内混雑の影響についても、混雑度に応じて利用者は混雑する列車を避けるか否かが変化していたが、多くの結果で有意に働かなかったため推定精度に課題があることが確認出来た。そして、Step model では CNL の適合度が高く、近接時間帯間に相関があることを確認できた。

今後の課題としては、他の路線においても同様に推定を行い、結果が変化するかどうかを確認することや、混雑率・CRIの算出についてより精度の高い算出方法を見つけて再度推定を行うことで本当に混雑による影響はどの程度あるのかを再度確認すること、更にはこの不効用パラメータを用いて遅延の影響も考慮できる出発時刻選択モデルを構築すること、複数路線が存在する場合の経路選択モデルに生かすことなどが挙げられる。

参考文献

- 1) 国土交通省統計情報 混雑率データ
<http://www.mlit.go.jp/common/001025446.pdf>
- 2) Vickrey W.: Congestion theory and transport investment, *The American Economic Review*, Vol. 59, No. 2, pp. 251-260, 1969.
- 3) Vickrey W.: Pricing, metering and efficiently using urban transportation facilities. *Highway Research Record*, Vol. 476, pp. 36-48, 1973.
- 4) Fosgerau M. and Engelson L.: The value of travel time variance. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 45, No. 1, pp. 1-8, 2011.
- 5) 岩倉成志, 原田知可子: 都市鉄道のピーク需要分散案を念頭に置いた時刻別需要予測モデルの分析, 運輸政策研究. Vol.8, No.3, pp. 4-15, 2005.
- 6) 松村 杏子, 武藤 滋夫, 福田 大輔, 柳沼 秀樹: 混雑した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, 45 巻, No.165, 2012.
- 7) Xie C, Fukuda D.: Scheduling preference modeling of rail passengers in Tokyo Metropolitan Area and evaluation of time-varying fare policy for a congested urban railway line. *Journal of Japan Society of Civil Engineers Series D3*, Vol.70, No.5, pp. I_509-I_520, 2014.
- 8) 国土交通省: 大都市交通センサス, 2010.
- 9) 国土交通省報道発表資料 サービスの高度化に伴い発生する遅延等に対応した定時運行の確保方策に関する調査
<http://www.mlit.go.jp/common/000167546.pdf>
- 10) 国土交通省交通政策審議会 遅延対策ワーキング・グループ 報告資料
<http://www.mlit.go.jp/common/001081639.pdf>

Rail passengers' departure time choice model in the Tokyo Metropolitan Area: considering the effects of train congestion and trip distance

Yoshikazu KIKUCHI and Daisuke FUKUDA

In Tokyo Metropolitan Area, congestions of some train lines have been very heavy in the morning period. Train operators are striving to alleviate the congestion by trains capacity enhancement measures such that new lines' constructions, train line's enhancement constructions and new trains installation. However, some lines congestion rate is still high situation, more than 180%. Therefore, congestion-mitigation countermeasure is not enough and need to do further measure, but traditional train capacity enhancement measures have limitations on convenience of place and budget, so we need to consider new train congestion mitigation measures. Railway commuters' demand dispersion movements is one of the mitigation measures, and to evaluate the effect of this measure, it is necessary to build models of railway commuters' departure time choice behavior appropriately.

In this study, we carry out regression analysis to understand the basic behavior of commuters and estimate the disutility parameter of congestion and gap from users' desired arrival time by using metropolitan transportation census in some lines in Tokyo metropolitan area to examine the specific of each railway line.