

所要時間不確実性下における出発時刻決定行動に関する分析*

Departure Time Decision Model of Railway Users under Travel Time Uncertainty *

横山茂樹**・高田和幸***

By Shigeki YOKOYAMA**・Kazuyuki TAKADA***

1. はじめに

首都圏の鉄道旅客は、移動に際して異なる路線間の乗り換えを伴うことが多い。この乗り換えの不便さの低減や、乗り換え駅における混雑緩和を目的として、異なる鉄道事業者の路線を接続し、他社の路線に直接列車が進入する相互直通運転方式が積極的に導入されてきた。

しかし、この相互直通運転方式は、旅客の利便性を向上させる一方で、運行障害が生じた際の影響範囲が空間的に拡大してしまうという課題も含んでいる。

時間厳守性が世界から高く評価されていた日本の鉄道ではあるが、国土交通省が調査した鉄道事故統計によると、ここ5年間、鉄道事故発生件数は増加傾向にあり、首都圏における列車の遅延本数は、2009年度には4万本を超える状況となっている。

軌道系交通機関のサービスの特徴である「時間厳守性」が確保されなければ、旅客は一定時間の遅延を見込んで出発時刻を決めざるを得ず、交通所要時間の増大という点で不便を被ることになる。よって今後は「所要時間信頼性」を向上させるための取り組みが必要となると考えられる。

このような背景を鑑み、本研究では、鉄道旅客が移動に際してどの程度の余裕時間を見積もっているかを推計する手法を構築し、鉄道旅客に対して実施した調査データを用いて、その推計を試みた。

2. 既往研究

道路交通においては、出発時刻選択行動から所要時間の信頼性の評価を行った研究が数多くある。Smallら^{1) 2) 3)}は、古くから所要時間の信頼性に着目し、所要時間の変動(不確実性)を指数分布に従うと仮定して、

最適出発時刻を求めている。これら研究事例を整理すると、「平均-分散アプローチ」、「スケジューリングアプローチ」といった共通するモデリング方法から時間信頼性を評価していることが見受けられる。

平均-分散アプローチでは、移動所要時間を、その平均と標準偏差の線形和で表現している。これは、旅客者は、所要時間の長さとはばらつきをトレードオフ関係として据えていると解釈できるモデルである。一方、スケジューリングアプローチは、決まった時刻までに目的地に着かなければならないという到着時刻制約を持つ旅行者は、早着・遅着を最小による不効用を最小にするよう出発時刻選択を行うといった解釈から不効用関数を定式化している。

近年、これに対して Fosgerauら^{4) 5)}は、これら2つのアプローチを統合した方法を開発した。統合アプローチでは、スケジューリングアプローチタイプの不効用関数を定義し、旅行者の最適化行動を据えている。また、到着時刻制約を必要としないため、分析上の汎用性が高いとされる。

一方、鉄道旅客の出発時刻の選択については、家田ら⁶⁾は、都市鉄道の混雑不効用や、起床時刻の不効用、余暇減少不効用などの変数から出発時刻選択モデルを構築している。また岩倉ら⁷⁾は、ピーク需要分散策を念頭に置き、実務での分析に即した時刻別需要予測モデルの構築を試みている。ただし、これらの事例では、所要時間の信頼性は考慮されていない。

鉄道の所要時間信頼性を対象にした既往研究には、Smallら⁸⁾、Careyら⁹⁾、Higginsら¹⁰⁾、Reitveldら¹¹⁾などがあり、詳細は高田ら¹²⁾がまとめている。これら4編は、通常時のサービスの信頼性向上を念頭においた研究である。

以上、道路と鉄道の出発時刻選択に関する既往研究、および所要時間の信頼性評価に関する既往研究について整理した。その結果、鉄道旅客の知覚遅延分布を考慮して出発時刻の決定行動を定量的に分析した事例は見受けられなかった。そこで本研究では、鉄道旅客の実行動データをもとに、移動に際して予め見積もっている余裕時間のモデル化を行うこととした。

*キーワード：所要時間信頼性、出発時刻決定行動、MCMC

**非会員、修士(工学)、社会システム株式会社

***会員、博士(工学)、東京電機大学理工学部建築都市環境都市学系(埼玉県比企郡鳩山町石坂、



Q1:あなたが普段最もよく利用している鉄道事業者名、路線名・駅名・乗降車区間を教えてください。なお、途中で乗り換える場合は乗り換え駅も教えてください。
※プライベートや、ビジネスなど、使用の目的は問いません。

【乗車駅について】

鉄道事業者名 (必須入力) 例:JR
 路線名 線 (必須入力) 例:山手
 駅名 駅 (必須入力) 例:池袋

Q2:あなたは、Q1で回答した区間を移動する際、乗車駅から降車駅までどのくらいの時間がかかると想定していますか。

時間 分くらいかかると考えている

図 - 1 アンケート調査（一部抜粋）

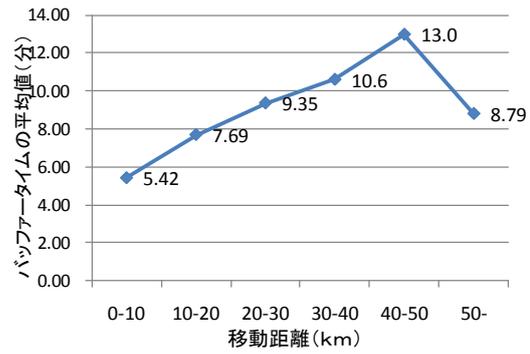


図 - 2 移動距離とバッファタイムとの関係

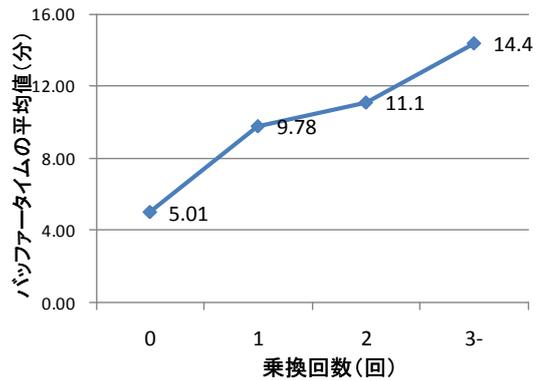


図 - 3 乗換回数とバッファタイムとの関係

3. アンケート調査の概要

近年、インターネット・モニター調査は、サンプル数確保の利点や回答結果の信頼性が高いことから信頼できる調査手法として確立されつつあり、総務省による調査においても利用されている。

そこで、本研究では、インターネット・モニター調査会社の株式会社マクロミルに委託し、鉄道利用状況に関するアンケート調査を実施した。調査対象となった回答者モニターは15歳以上の有職者（パート・アルバイトを含む）とし、首都圏の1都3県（東京・神奈川・千葉・埼玉）の居住者である鉄道利用者を対象とした。調査は平成21年7月11、12日の2日間にわたって515サンプルずつ実施し、総計1030サンプルの回答を得た。本研究で使用した有効回答データは863サンプルであった。

本研究では、図-1に示すアンケート調査で得た鉄道の利用頻度、普段最もよく利用する鉄道路線経路、認知所要時間、1週間の認知遅延回数・認知遅延損失時間を使用した。その他、アンケートの質問項目は、鉄道サービスに関する満足度、所要時間の信頼性向上に対する支払意思額に関する実施した。

4. バッファタイムの基礎分析

首都圏鉄道利用者が、現在被っている損失時間や遅延への遭遇経験など様々な条件によってバッファタイム（余裕時間）が異なっていると考えられる。そこで、本研究では、アンケートで収集した認知所要時間のデータと、実際の時刻表に基づく所要時間との差を、バッファタイムと定義し、バッファタイムの決定要因の基礎分析を行った。なお、回答結果のODの駅間の所要時間、乗換回数、移動距離に関するデータは、時刻表（2009年11月、JTB社）に基づき作成した。

図-2は、移動距離とバッファタイムとの関係を示した図である。移動距離が増大するにつれバッファタイムの平均値が増加していることが見て取れる。図-3は、乗換回数とバッファタイムとの関係を示した図である。乗換回数の増加に伴いバッファタイムの平均値も、増加する傾向にあることが見て取れる。

これらの結果より、移動距離および乗換回数はバッファタイムを決定する要因であると考えられ、後に推定する出発時刻決定行動モデルの説明変数として考慮することとした。

5. 出発時間決定行動に関する分析

(1) 出発時刻決定行動モデルの特定化

本研究では、Fosgerau^{4) 5)}が開発した平均-分散アプローチとスケジューリングモデルの統合アプローチモデルを援用し、首都圏鉄道旅客の出発時刻決定行動について分析を行う。

このモデルの概要は、利用者が被る「所要時間の不確実性に対し出発時刻を早めることの不効用」, 「所要時間に対する不効用」, 「遅着に対する不効用」から構成される。希望到着時刻を 0 と仮定し、出発時刻を D とする。すなわち出発時刻は D となる。その不効用関数を以下に示す。

$$U(D, T) = \alpha D + \omega T + \beta(T - D)^+ \quad (1)$$

第 1 項は、早発の不効用, 第 2 項: 所要時間の不効用,
第 3 項: 遅着不効用
 T : 所要時間, D : 出発時間

単一リンクにおける日々の所要時間変動を考慮し、所要時間 T を確定部分と確率変動の 2 つの構成に分解する。

$$T = \mu + \sigma X, \quad X \sim \phi(0, 1) \quad (2)$$

よって所要時間は、ここで、 μ は平均所要時間, σ は所要時間の標準偏差, X は平均 0, 分散 1 の標準化した分布である。さらに、 X はその確率密度関数を ϕ , 分布関数を Φ で表す。

本研究においても、鉄道旅客は遅延時間を認知して出発時刻を決定していると仮定し、所要時間 T を時刻表ベースの所要時間と遅延時間とに分離した。

$$T = \mu + T_L \quad (3)$$

ここで、 μ は時刻表に基づく所要時間, T_L は遅延時間である。ここで、 T_L については、鉄道では早着が生じないという特徴を有するため、その分布には指数分布を仮定し、 T_L の確率密度関数を $f(T_L)$, 分布関数を $F(T_L)$ で表現した。

よって所要時間 T は確率的に変動する。そこで式(3)で表わされる期待不効用の最小化問題を解くことで、実際の出発時間が決定される。

$$E(U(D)) = \min \left[\alpha D + \omega \mu + \beta \int_{D-\mu}^{\infty} (\mu - T_L - D) f(T_L) dT_L \right] \quad (3)$$

式(3)を書き換えると最適ヘッドスタートを求めることができる。なお、アンケートで調査した旅客の認知所要時間が最適ヘッドスタートであると仮定すると、次式の関数で示すことができる。

$$F(D - \mu) = 1 - \frac{\alpha}{\beta} \quad (4)$$

$$D^* = \mu + F^{-1} \left(1 - \frac{\alpha}{\beta} \right)$$

D^* : 最適出発時間(認知所要時間),
 μ : 時刻表に基づく所要時間, α, β : 未知パラメータ
 F : 遅延時間の確率分布

ここで、 $\frac{\alpha}{\beta}$ は、最適遅着確率と呼ばれる。この式より、最適状態におけるヘッドスタートは、平均所要時間 + 所要時間の分布の $(1 - \frac{\alpha}{\beta})$ タイル値であることが分かる。また、式(4)を式(1)に導入すると最適ヘッドスタートを選択したときの期待不効用は以下で与えられる。

$$E(U(D^*)) = (\alpha + \omega)\mu + \beta H \left(\frac{\alpha}{\beta}, \Phi \right) \quad (5)$$

$$H \left(\frac{\alpha}{\beta}, \Phi \right) = \int_{1 - \frac{\alpha}{\beta}}^1 \Phi^{-1}(x) dx$$

ここで、式(5)の第 1 項の $(\alpha + \omega)$ は平均所要時間の限界費用、すなわち時間価値に相当する。一方、第 2 項の $\beta H \left(\frac{\alpha}{\beta}, \Phi \right)$ は所要時間の限界費用であり、所要時間信頼性価値となる。

さらに、鉄道は利用するネットワーク特性で損失している遅延時間が異なる。つまり、遅延確率分布が、鉄道路線環境によって変動し、その遅延時間に対する見積り時間を決定していることが表される。よって、本研究では、遅延確率分布を構造化し、共変量型の分布関数とした。その関数の詳細を以下に示す。

生存分析で用いられるパラメトリックモデルの基準ハザードが増減する比例ハザード関数を援用することで分布関数に鉄道ネットワーク特性の共変量を導入することができる。ハザード関数 $h(t)$ は、以下の式で表される。

$$h(t) = h_0 \exp(\beta x_i) = h_0 \exp \left(\sum_{i=1}^n \beta x_i \right) \quad (6)$$

本研究で用いる指数分布の基準ハザード関数は式(7)で示される。

$$h_0(t) = \lambda \quad (7)$$

よって、式(6)、(7)より、ハザード関数は式(8)で示される。

$$h(t) = \lambda \exp(\beta x_i) \quad (8)$$

ここで、ハザード関数と生存関数の関係式は式(9)で示される。

$$S(t) = \exp\left(-\int_0^t h(u) du\right) \quad (9)$$

また、ハザード関数は式(10)で定義される。

$$h(t) = \frac{f(t)}{S(t)} \quad (10)$$

よって、式(8)、(9)、(10)より、共変量を含んだ確率密度関数は式(11)で示される。

$$f(x) = \lambda \exp(\beta x_i) \cdot \exp(-\lambda T_r \exp(\beta x_i)) \quad (11)$$

x_i : 共変量, β : 共変量のパラメータ,
 λ : スケールパラメータ

さらに、式(11)の確率密度関数を分布関数に変換し、式(4)に導入すると、式(12)になる。

$$D^* = \mu - \left(\frac{\ln\left(-\left(1 - \frac{\alpha}{\beta}\right) + 1\right)}{\lambda \cdot \exp(\sum_{i=1}^n \theta x_i)} \right) \quad (12)$$

(2) 推定結果

本研究では、首都圏鉄道旅客の複数リンクによる異質性を考慮して、出発時刻決定行動の分析を行う。その方法として、階層ベイズモデルを適用し遅延確率分布の λ パラメータを各サンプルの推定値を把握した。また出発時刻の決定は正規分布に従って日々変動していると仮定し、式(15)の関数から出発時刻の決定要因の分析を行う。パラメータの推定にはマルコフ連鎖モンテカルロ法 (mcmc) を用いた。その際、 $\alpha\beta$ の事前分布に一様分布を仮定した。推定結果を表-1に示す。

はじめに、最適遅刻確率分布のパラメータである $\alpha\beta$ 表は0.045である、このことは4.5%の遅刻確率のリスクの下、鉄道旅客は最適出発時間の決定していることが示された。次に、共変量のパラメータの符号の解釈は、プラスの場合は期待遅延時間が小さくなり、マイナスの場合は大きくなることを示している。よって、移動距離から考察すると移動距離が増加することで期待遅延時間が

表 - 2 出発時刻決定行動モデルの推定結果

	パラメータ	t 値	事前分布
α	最適遅刻確率	0.045	Uniform
β	対数移動距離 (km)	-0.120	Normal
θ_1	乗換回数 (回/トリップ)	-0.217	Normal
θ_2	鉄道利用回数 (回/週)	-0.019	Normal
θ_3			
DIC		4186.4	
サンプル数		863	

大きくなり、鉄道旅客は遅延回避時間を大きく見積もることを意味する。乗換回数、鉄道利用回数もマイナスで推定されていることから同様の解釈ができる。

図-4にパラメータ λ の推定結果を示す。 λ が特定の分布に従うことなく幅広く分布している。このことは、 λ に関して旅客の異質性を考慮したことの妥当性を示すものである。

最後に、出発時刻と余裕時間の推定値の精度検証を行った。図-5、図-6は、それぞれの現況再現性を示した図である。共に決定係数 R^2 が0.95以上と高く、説明力の高いモデルが推定されたことを示している。

6. まとめと今後の展望

本研究では、遅延確率分布に対するリスク回避のための余裕時間を考慮した出発時間決定行動をモデル化した。そして、首都圏鉄道旅客を対象に実施した「鉄道利用状況に関するアンケート調査」のデータと、鉄道ネットワーク特性データを用いて、モデルのパラメータの推定を行った。その際、異なるODを考慮する首都圏鉄道対象のため複数リンクによる異質性を考慮した。

推定結果から異質性を表現したことで説明力の高いモデルを推定することが可能であることを示した。また移動距離、乗換回数、鉄道利用回数が増加することで、遅延確率分布による期待遅延時間が増大することが確認された。

本研究では、認知遅延時間が指数分に従っているという強い前提条件の下で解析を行った。今後は、より一般性の高い分布であるワイブル分布を仮定するか、あるいは分布形を仮定しないノンパラメトリック分析を適用して、出発時刻選択行動分析の精緻化を図ることが必要である。

また1章では「所要時間信頼性」を考慮した鉄道整備を進めていく必要性を述べた。そのためには、実所要時間や本研究の成果から所要時間信頼性の向上に対する経済価値を算出することが必要不可欠である。

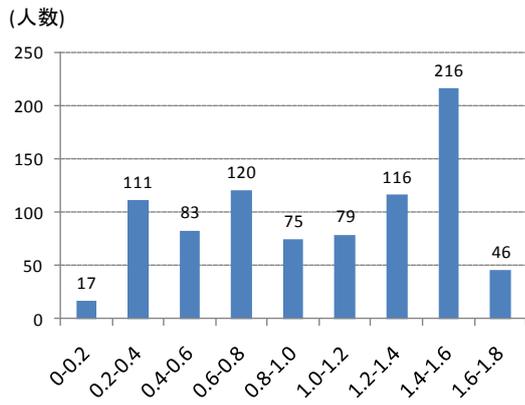


図-4 λパラメータの分布

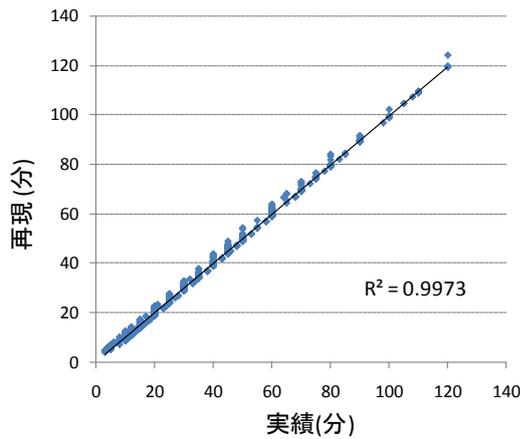


図-5 出発時刻の現況再現性

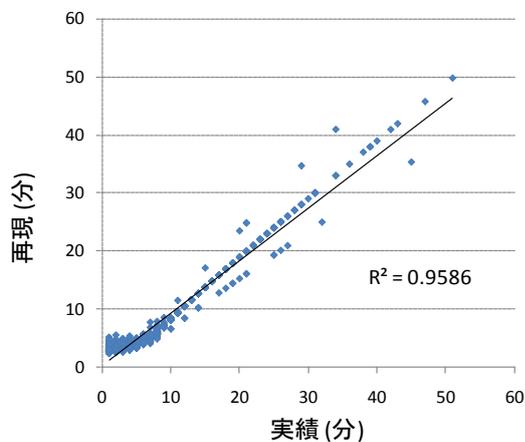


図-6 余裕時間の現況再現性

参考文献

- 1) K. A. Small, : The scheduling of consumer activities : work trip, American Economic Review, 72(3), pp.467-479, 1982.
- 2) Robert B. Noland, K. A. Small. : Travel-time uncertainty, departure time choice, and the cost of the morning commute, Transportation Research Record, 1995.
- 3) D. Brownstone, K. A. Small. : Valuing time and reliability: assessing the evidence from road pricing demonstration, Transportation Research Part A, Policy and Practice, 39(4), pp.279-293, 2005.
- 4) M. Fosgerau, A. Karlstrom. : The value of reliability and the distribution of random durations, European Transport Conference, 2007.
- 5) M. Fosgerau, A. Karlstrom.: The value of reliability: Transportation Research Part B, Vol.44, No.1,33-49, 2010.
- 6) 加藤浩徳, 家田仁 : MNL に基づく出発時刻選択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, 土木計画学研究・論文集, Vol.20, No.3, pp.523-530, 2008.
- 7) 岩倉成志, 原田知可子 : 都市鉄道のピーク需要分散策を念頭においた時刻別需要予測モデルの研究, 運輸政策研究, Vol.8, No.3, pp.4-15, 2005 Autumn.
- 8) Terence C. Lam and Kenneth A. Small : The value of time and reliability: measurement from a value pricing experiment, Transportation Research Part E, 37, pp.231-251,2001
- 9) Terence C. Lam and Kenneth A. Small and Carey, M : Reliability of Interconnected scheduled service, European Journal of Operations Research, 79, pp.51-72, 1994.
- 10) Higgins, A., Kozan, E. : Modeling train delays in urban networks, Transportation Science, 32, pp.346-357, 1998.
- 11) Rietveld, P., Bruinsma, F.R. and Van Vuuren, D.J.: Coping with unreliability in public transport chains: A case study for Netherlands, Transportation Research Part A, 35, pp.539-559, 2001.
- 12) 高田和幸, 吉澤智幸 : 鉄道事故に伴う旅客の損失時間の推計手法に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.22, pp.863-868,2005.