

列車の遅延を考慮した都市鉄道利用者の出発時刻選択行動に関する分析*

Departure Time Choice under the Condition of Daily Service Delay in Urban Railway*

曾山禎彦**・金子雄一郎***・加藤浩徳****

By Yoshihiko SOYAMA**・Yuichiro KANEKO***・Hironori KATO****

1. はじめに

近年、東京圏の鉄道では多くの路線で輸送トラブルによる遅延が発生している。最近では、輸送障害に至らないような混雑や高密度運行を原因とする日常的な遅延が通勤時間帯を中心に発生している。こうした遅延は、相互直通運転の拡大に伴って複数の路線へ波及し、多くの鉄道利用者に影響を及ぼしている。このような問題を解決していくためには、例えば待避線や折り返し施設の設置などの対策が有効と考えられるが、これらの施策の導入効果を評価するためには、遅延によって影響を受ける鉄道利用者の出発時刻選択の行動特性を理解する必要がある。

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 Hall¹⁾ は、遅刻ペナルティの大きさと早発の不効用がトレードオフの関係であると仮定することにより、通勤者は出発時刻を決定しているものと定式化している。また、Small²⁾ は、到着時刻と決められた始業時刻との差によりスケジュール遅着とスケジュール早着の効用関数を定義し、効用最大化による時刻選択行動を定式化している。しかし、既往の実証研究の大半は自動車交通を対象としているほか、時刻が離散的に扱われている。また、鉄道については、短時間の遅延に関する統計的なデータが存在していないため、列車の遅延分布を考慮した定量的な分析が殆ど行われていない。

本研究では、通勤、通学時における鉄道利用者の出発時刻選択行動を把握し、遅延による影響を考慮した出発時刻選択行動モデルを構築することで、遅延対策の実施による効果を評価するための手法を開発することを目的とする。

*キーワード：列車遅延、出発時刻選択

**正員、修(工) 元日本大学大学院理工学研究科土木工学専攻

***正員 博(工) 日本大学理工学部土木工学科

(〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14

TEL : 03-3259-0664 FAX : 03-3259-0664)

****正員 博(工) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻

(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

TEL : 03-5841-7451 FAX : 03-5841-8506)

2. 出発時刻選択モデルの構築

(1) 基本的なモデル構造

通勤、通学目的の鉄道利用者 n は始業時刻の制約の下で、自らの効用を最大化するように自宅の出発時刻 t_{ns} を決定するものと仮定する。ここでは個人の直接効用関数 U_n を、①朝の余暇時間によってもたらされる部分効用 $u_{nTnp}(t_{ns})$ 、②乗車時間によってもたらされる部分効用 $u_{nTnt}(t_{ns})$ 、③入社希望時刻から離れた時間によってもたらされる部分効用 $u_{nTnm}(t_{ns})$ 、④始業時刻から遅れた時間によってもたらされる部分効用 $u_{nTnd}(t_{ns})$ から構成されるものと仮定し、以下に示す条件付効用最大化問題として定式化する。

$$\max U_n(t_{ns}) = u_{nTnp}(t_{ns}) + u_{nTnt}(t_{ns}) + u_{nTnm}(t_{ns}) + u_{nTnd}(t_{ns}) \quad (1)$$

$$\text{subject to } t_{nr} = t_{ns} + T_{na} + \tilde{T}_{nt} + T_{ne} \quad (2a)$$

$$T_{np} > 0, \tilde{T}_{nt} > 0, T_{na} > 0, T_{ne} > 0 \quad (2b)$$

ここで、 T_{np} : 個人 n の朝の余暇時間、 T_{na} : 個人 n のアクセス時間、 \tilde{T}_{nt} : 個人 n の乗車時間、 T_{ne} : 個人 n のイグレス時間である。なお、単純化のため自宅から出発駅へのアクセス時間、到着駅から最終目的地へのイグレス時間については一定であると仮定する。また、各個人の起床時刻、始業時刻は所与であると仮定する。ただし、朝の余暇時間、アクセス時間、列車の乗車時間、イグレス時間は必ず存在するものと考えられるので、正值であるという条件を設定している。

(2) 部分効用関数の特定化

①朝の余暇時間に関わる部分効用

$u_{nTnp}(t_{ns})$ は、起床時刻 t_{ng} と自宅出発時刻 t_{ns} によって生じる部分効用で、消費する時間の増加にしたがって単調増加するが、限界効用は逓減するものとする。

$$u_{nTnp}(t_{ns}) = \alpha_{np} \ln T_{np} = \alpha_{np} \ln(t_{ns} - t_{ng}) \quad (3)$$

ここで、 t_{ng} : 個人 n の起床時刻、 α_{np} : 朝の余暇時間に対する係数パラメータであり、 $\alpha_{np} > 0$ である。

②列車乗車に関わる部分効用

$u_{nTnt}(t_{ns})$ は、列車の乗車時間によって生じる部分効用である。その際、効用は乗車時間に比例して単調減少し、

限界効用は逡減するものとする。なお乗車時間 \tilde{T}_{nt} は、時刻表上の乗車時間 T_{nt}^0 に遅延による追加乗車時間を加えたものとする。追加乗車時間は各個人 n の認知乗車時間 ε_n とし、特定の確率分布に従うものと仮定する。

$$u_{nT_{nt}}(t_{ns}) = \alpha_{nt} \ln \tilde{T}_{nt} = \alpha_{nt} \ln (T_{nt}^0 + \varepsilon_n) \quad (4)$$

ここで、 T_{nt}^0 ：個人 n の時刻表通りの乗車時間、 ε_n ：

個人 n の認知追加乗車時間 ($\varepsilon_n > 0$)、 α_{nt} ：個人 n の乗車時間に対する係数パラメータであり $\alpha_{nt} < 0$ である。

③希望時刻乖離に関わる部分効用

$u_{nT_{nm}}(t_{ns})$ は、出社希望時刻と実際の出社時刻との乖離によって生じる部分効用である。個人 n は、出社希望時刻 t_{nr}^0 を持っているものとし、実際の出社時刻 t_{nr} が希望時刻から乖離するにしがって効用が単調減少するものと仮定する。その際、効用水準は以下のように乖離時間の2乗に比例して大きくなると仮定する。

$$u_{nT_{nm}}(t_{ns}) = \alpha_{nm} (t_{nr} - t_{nr}^0)^2 \quad (t_{nr}^0 \leq t_{nr}, t_{nr} < t_{nr}^0) \quad (5)$$

ここで、 t_{nr} ：個人 n の出社時刻、 t_{nr}^0 ：個人 n の出社

希望時刻、 α_{nm} ：個人 n の希望到着時刻からの乖離時間に対する係数パラメータであり、 $\alpha_{nm} < 0$ である。

④遅着に関わる部分効用

$u_{nT_{nd}}(t_{ns})$ は、始業時刻と出社時刻とによって生じる部分効用である。個人 n の出社時刻 t_{nr} が始業時刻 t_{nw} より遅い場合に、遅刻時間に比例して単調減少するものと仮定する。その際、効用水準は、以下のように遅着時間の2乗に比例して大きくなると仮定する。

$$u_{nT_{nd}}(t_{ns}) = \begin{cases} \alpha_{nd} (t_{nr} - t_{nw})^2 & (t_{nw} < t_{nr}) \\ 0 & (t_{nw} \geq t_{nr}) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 t_{nw} ：個人 n の始業時刻、 α_{nd} ：個人 n の遅着時間に対する係数パラメータであり、 $\alpha_{nd} < 0$ である。

⑤効用関数の定式化

各部分効用に対する係数パラメータは個人属性に依存すると考えられるので、各部分効用の条件から正負を勘案し、以下のように定式化する。

$$\alpha_{np} = \exp(A_p X_n^p), \alpha_{nt} = -\exp(A_t X_n^t) \quad (7a), (7b)$$

$$\alpha_{nm} = -\exp(A_m X_n^m), \alpha_{nd} = -\exp(A_d X_n^d) \quad (7c), (7d)$$

ここで A_p, A_t, A_m, A_d ：未知パラメータベクトル、

$X_n^p, X_n^t, X_n^m, X_n^d$ ：個人 n の個人属性ベクトルである。

以上をまとめると、個人の効用関数は以下ようになる。

if $t_{nw} < t_{nr}$

$$U_n(t_{ns}) = e^{A_p X_n^p} \ln(t_{ns} - t_{ng}) - e^{A_t X_n^t} \ln(T_{nt}^0 + \varepsilon_n) - e^{A_m X_n^m} (t_{ns} + T_{na} + T_{nt}^0 + \varepsilon_n + T_{ne} - t_{nr}^0)^2 - e^{A_d X_n^d} (t_{ns} + T_{na} + T_{nt}^0 + \varepsilon_n + T_{ne} - t_{nw})^2 \quad (8a)$$

if $t_{nw} \geq t_{nr}$

$$U_n(t_{ns}) = e^{A_p X_n^p} \ln(t_{ns} - t_{ng}) - e^{A_t X_n^t} \ln(T_{nt}^0 + \varepsilon_n) - e^{A_m X_n^m} (t_{ns} + T_{na} + T_{nt}^0 + \varepsilon_n + T_{ne} - t_{nr}^0)^2 \quad (8b)$$

(3) パラメータの推定方法

個人の効用関数の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。

$$\left. \frac{\partial U(t_{ns})}{\partial t_{ns}^*} \right|_{t_{ns} = t_{ns}^*} = 0 \quad (9)$$

これにより ε_n は以下のように求められる。

$$\varepsilon_n = \frac{1}{2(e^{A_m X_n^m - A_p X_n^p} + e^{A_d X_n^d - A_p X_n^p})(t_{ns}^* - t_{ng}) - (t_{ns}^* + T_{na} + T_{nt}^0 + T_{ne} - t_{nr}^0) - (1 + e^{A_d X_n^d - A_m X_n^m})} - \frac{(t_{ns}^* + T_{na} + T_{nt}^0 + T_{ne} - t_{nw})}{(e^{A_m X_n^m - A_d X_n^d} + 1)} \quad (t_{nw} < t_{nr}) \quad (10a)$$

$$\varepsilon_n = \frac{1}{2e^{A_m X_n^m - A_p X_n^p} (t_{ns}^* - t_{ng}) - (t_{ns}^* + T_{na} + T_{nt}^0 + T_{ne} - t_{nr}^0)} \quad (t_{nw} \geq t_{nr}) \quad (10b)$$

ここで、誤差項 ε_n が、平均 $1/\lambda$ 、分散 $1/\lambda^2$ の指数分布に従うケースと、平均 μ 、分散 σ^2 の切断された正規分布に従うケースを想定する。

①指数分布を仮定するケース

追加乗車時間が指数分布に従うと仮定する理由は、実際の運行遅延時間が指数分布によって表現できると考えられているためである(例えば、高田ら⁴⁾)。この場合、以下のような個人の尤度関数が得られる。

$$L_n = \prod_{i \in I_1} \beta \lambda \exp(-\beta \lambda \varepsilon_{n,i}) \prod_{i \in I_2} \beta \lambda \exp(-\beta \lambda \varepsilon_{n,i}) \quad (11)$$

ここで、 L_n ：個人 n の尤度関数、 λ ：指数分布のパラメータ、 β ：遅延の平均によって決まる指数分布パラメータ λ と認知の乖離を補正する係数、 $\varepsilon_{n,i}$ 個人 n の出社時刻条件 i の時の認知追加乗車時間である。

②切断された正規分布を仮定するケース

鉄道は運行スケジュールが決まっており、追加乗車時間が負になる、すなわち予定時刻より早く到着するという現象は一般に起こらない。そこで、以下のように ε_n が切断された正規分布に従うと仮定する。

$$\begin{cases} \text{if } \tilde{T}_{nt} \leq T_{nt}^0 & \varepsilon_n = 0 \\ \text{else } \tilde{T}_{nt} > T_{nt}^0 & \varepsilon_n \sim N(\mu, \sigma^2) \end{cases} \quad (12)$$

その結果、以下のような個人の尤度関数が得られる。

$$L_n = \prod_{i \in I_1} \frac{1}{\sigma} \phi\left(\frac{\varepsilon_{n,i} - \mu}{\sigma}\right) \prod_{i \in I_2} \frac{1}{\sigma} \phi\left(\frac{\varepsilon_{n,i} - \mu}{\sigma}\right) \quad (13)$$

$$I_1 = \left\{ n \mid t_{nr} < t_{mv} \right\}, I_2 = \left\{ n \mid t_{nr} \leq t_{mv} \right\} \quad (14a), (14b)$$

ここで、 $\phi(\cdot)$: 標準正規分布の確率密度関数、 I_1, I_2 : 個人の部分集合である。

3. データの収集と基礎分析

(1) 鉄道利用者へのアンケート調査の概要

実証分析を行うにあたっては、鉄道利用者の通勤時間帯の行動データが必要となるが、代表的な統計調査である「大都市交通センサス」は、始業時刻や列車の遅延に関する経験や意識等を把握することができない。そのため独自の調査を実施することにより、データを収集した。調査の概要は表-1 に示されるとおりである。ここでは一例として東急田園都市線の利用者を対象とする。同線の4駅において計1,920票のアンケート票を配布し721票(36.7%)を回収、有効回答536票を得た。

(2) 調査結果の概略

得られたデータの特性を表-2 に示す。性別では男性、年齢では40歳代が多い。職業は会社員が76.1%と多く、次いでその他(派遣社員やパート等)となっている。始

表-1 都市鉄道遅延に関するアンケート調査の概要

項目	概要
調査日時	平成21年11月12日(木) 午前6時~午前10時
対象路線	東急田園都市線
調査駅	鷺沼駅※、たまプラーザ駅※、江田駅、市が尾駅 (ターミナル駅から中程度の距離に位置し、他線との乗り換えのない駅) ※急行(準急)停車駅
調査方法	駅改札付近で配布、郵送回収
配布枚数	1920票
回収枚数	721票(36.7%)
調査項目	A) 鉄道の利用状況 1) 利用頻度、2) 利用目的 B) 普段の通勤・通学の行動 1) 起床時刻、2) 出発時刻、3) アクセス手段及び時間、 4) 列車への乗車時刻、5) 利用経路、6) 最終降車時刻、 7) イグレス手段及び時間、8) 到着時刻、9) 始業時刻、 10) 始業時刻の固定性 C) 列車の遅延に対する経験や意識 1) 遅延の経験、2) 遅延を意識した行動の有無、 3) 遅延発生時の対応、4) 居住地決定、5) 居住年数 D) 個人属性 1) 性別、2) 年齢、3) 職業、4) 業種、5) 定期券保有の有無

表-2 都市鉄道遅延に関するアンケート調査の結果

項目	割合						
性別	男性 66.8%	女性 33.2%					
年齢	20歳未満 1.1%	20歳代 4.7%	30歳代 19.4%	40歳代 38.1%	50歳代 24.1%	60歳代 11.6%	70歳代以上 1.1%
職業	会社員 76.1%	会社員役員 5.6%	公務員 5.6%	自営業 0.7%	学生 2.2%	無職 0.2%	その他 9.5%
始業時刻の固定性	80.8%	固定 8.8%	フレックスタイム 10.4%				
代替経路利用	利用する 59.5%	利用しない 40.5%					
15分以上の遅延経験	よくある 6.3%	たまにある 58.6%	ほとんどない 31.7%	ない 3.4%			
遅延を意識した行動	意識 26.5%	少し意識 47.2%	ほとんど意識なし 21.5%	意識なし 4.9%			
出発時刻	4時台 0.2%	5時台 0.7%	6時台 27.6%	7時台 41.4%	8時台 26.3%	9時台 3.7%	

業時刻に関しては決まっている人が89.6%であり、70.8%の人が遅延を意識して行動している。出発時刻に関しては95.3%が午前6時~9時に自宅を出発している。

4. 遅延時間分布の推定

ε_n に指数分布を仮定するケースで使用する遅延実績分布の未知パラメータは、2008年10月の午前6時~11時の5時間に東急田園都市線渋谷駅に到着する上り列車の時刻表からの遅延時間(列車本数2,280本分)を集計したデータにより推定する。なお、実績遅延時間の平均は2.6分であった。遅延分布の推定結果を表-3に示す。どの時間帯も t 値が高く有意である。この結果から、遅延時間の分布は概ね指数分布で表現できることが確認された。

5. パラメータの推定結果

パラメータの推定にあたっては、対象路線における時間帯別の鉄道利用者数の分布が、実績値に適合するように重み付けをした上で、尤度関数の最大化を行った。各パラメータの変数の定義を表-4に、パラメータの推定結果を表-5にそれぞれ示す。

まず、 ε_n が指数分布に従うと仮定した場合、指数分布のパラメータ係数 β を除いて、統計的に有意な結果が得られなかった。次に ε_n が切断された正規分布に従うと仮定した場合は、概ねどのパラメータについても有意な推定結果が得られた。また、尤度比検定により、有意水準1%で初期状態と一致するという帰無仮説が棄却されるという結果が得られた。なお、Model2~4は変数の組み合わせを変えてパラメータ推定を行った結果である。以下では、すべてのパラメータが統計的に有意となった、Model2について、得られた結果の考察を行う。

まず、朝の余暇時間に関わる部分効用については、代替経路がない人ほど、また女性ほど朝の余暇に対する限界効用が高く、一方で年齢が高いほど限界効用が低くなる傾向にある。

希望時刻からの乖離に関わる部分効用については、始業時刻が固定されていない人ほど、また普段から遅延を意識して行動していない人ほど、会社員や公務員以外の人ほど、入社時刻が出社希望時刻から乖離することによる限界効用の絶対値が大きくなる傾向にある。アンケート調査結果より、パートや派遣社員は会社員に比べて遅刻に対するペナルティが大きいことから、これが限界効用の高くなる原因と考えられる。

遅着効用に関わる部分効用については、始業時刻が固定されている人ほど、また男性ほど、遅刻に対する限界効用の絶対値が高くなる傾向にある。

表-3 遅延時間分布の推定結果 (指数分布)

	6時台	7時台	8時台	9時台	10時台	6時~11時
パラメータ	0.891	0.702	0.327	0.278	0.402	0.379
(t値)	(10.91)	(12.51)	(29.13)	(31.19)	(10.39)	(17.35)

表-4 説明変数の定義

変数	定義
始業時刻の固定性	決まっている=1, だいたい決まっている・フレックス=0
15分以上の遅延経験	よくある・たまにある=1, ほとんどない=0
遅延を意図した行動	意図, 少し意図=1, ほとんど意図していない・意図していない=0
トラブル遭遇時の代替経路利用	利用する=1, 利用しない=0
性別	男性=1, 女性=0
年齢	60歳以上=1, それ以外=0
職業	会社員・公務員=1, それ以外(パート, 派遣, アルバイト, 学生など)=0

表-5 パラメータの推定結果

効用	変数	指数分布		正規分布	
		Model1 パラメータ(t値)	Model2 パラメータ(t値)	Model3 パラメータ(t値)	Model4 パラメータ(t値)
A_p	代替経路利用	-	-1.05 (-6.84**)	-1.47 (-8.04**)	-1.87 (-3.93**)
余暇	性別	-21.01 (-0.045)	-1.00 (-4.19**)	-0.95 (-1.90*)	-1.69 (-3.53**)
	年齢(60歳以上)	-14.41 (-0.15)	-0.44 (-2.14*)	-0.54 (-2.44*)	-0.59 (-2.40*)
	始業時刻の固定性	-32.3 (-0.04)	-2.09 (-6.69**)	-2.71 (-5.00**)	-2.57 (-5.20**)
A_m	乗車	-	-	-1.27 (-5.24**)	-
	15分以上の遅延経験	-	-	-	-
	遅延に対する行動	-	-1.30 (-6.81**)	-	-1.65 (-6.08**)
	年齢(60歳以上)	-	-	-	-
A_d	職業	-	-0.68 (-3.58**)	-0.69 (-2.15*)	1.34 (1.481)
	始業時刻の固定性	-12.35 (-0.25)	4.75 (2.26**)	8.85 (0.514)	-0.91 (-2.00**)
	性別	-	2.09 (4.72**)	2.16 (3.13**)	2.91 (3.57**)
遅着	職業	-	-	-	-0.17 (-0.94)
	定数項	-0.41 (-1.61)	-5.70 (-2.67**)	-9.81 (-0.57)	-
μ	平均	-	2.77 (6.24**)	2.40 (5.71**)	2.58 (5.38**)
	分散	-	204.98 (65.65**)	206.45 (65.65**)	210.06 (65.65**)
β	λ に係る係数	0.81 (46.42)	-	-	-
	サンプル数	536	536	536	536
	初期尤度	-31859.1	-2374397.1	-2374397.1	-2374397.1
	最終尤度	-4687.8	-8792.1	-8799.8	-8818.5
	AIC	9387.6	4731210.0	4731194.7	4731157.3

注: 表中の**は有意水準1%で, *は有意水準5%である。

また, ε_n の平均, 分散についても統計的に有意な推定結果が得られた。なお, 指数分布を仮定した場合, 統計的に有意な推定ができなかったことから, 実際の遅れは指数分布に従っているものの, 利用者は日常的に正の列車遅延時間に直面していると考えており, 平均遅延時間からの変動を不確定要素と認識していると考えられる。

6. 遅延防止策実施による利用者便益の試算

(1) モデルの再現性

表-5 の Model2 の推定パラメータを用いて, サンプルデータに対して, 最適出発時刻 t_{ns}^* を推定した結果と実績値との比較を図-1 に示す。推定最適出発時刻は観測値に比べてやや遅い時刻にシフトしている。これは, 混雑による不効用を表現できていないことが原因として考えられる。ただし, 両者間の相関係数は 0.91 であり, モデルの再現性はかなり高いと言える。

(2) 遅延防止策実施による利用者便益の算定方法

利用者便益の算定には, 正規分布で記述される遅延時間分布の平均や分散を変動させる方法が考えられる。ここでは一例として, 遅延時間の切断されていない正規分布についてその分散は一定のままで平均値のみを減少させるような遅延防止策が実施される場合の利用者便益の算定方法を示す。ただし, 先にも仮定したように, 鉄道では遅延時間が負になるという現象は一般に起こらない。そのため, これを考慮すると, 遅延防止策実施によって,

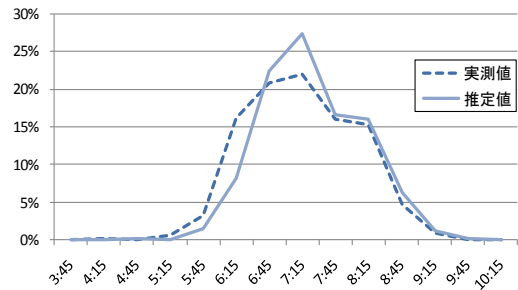


図-1 出発時刻分布の実測値と推定値との比較

遅延時間分布が 0 以上の部分での平均値と分散はともに変化する可能性がある。遅延時間分布が 0 以上の部分の平均値と分散は, 以下のように示される。

$$E_t[\varepsilon] = \int_0^{\infty} \varepsilon \cdot f_t(\varepsilon) d\varepsilon \quad (15a)$$

$$V_t[\varepsilon] = \int_0^{\infty} (\varepsilon - E_t(\varepsilon))^2 \cdot f_t(\varepsilon) d\varepsilon \quad (15b)$$

ここで, $E_t[\varepsilon]$: ケース t の平均遅延時間, $V_t[\varepsilon]$: ケース t の遅延時間の分散の期待値, $f_t(\varepsilon)$: ケース t の遅延時間に関する切断された正規分布の確率密度関数である。

したがって, 遅延防止策実施前と実施後の遅延時間の平均と分散がそれぞれ $(E_o[\varepsilon], V_o[\varepsilon])$ と $(E_w[\varepsilon], V_w[\varepsilon])$ である場合, この遅延防止策実施による利用者便益は, 以下のように算出できる。

$$UB_n = \frac{VOT_n}{\partial U / \partial \tilde{T}_m} [U_{w,n}^*(t_{w,ns}^*) - U_{o,n}^*(t_{o,ns}^*)] \quad (16)$$

VOT_n : 個人 n の時間価値, UB_n : 個人 n の利用者便益である。

7. おわりに

本研究では鉄道の遅延の影響を考慮した出発時刻選択行動モデルを構築し, 遅延防止策実施による利用者便益の算定方法を示した。今後は混雑不効用の導入や具体的な遅延防止策を検討する。

謝辞: 東京急行電鉄(株)の各位には, アンケート調査の実施にあたり多大なご協力をいただくとともに, 混雑率及び遅延に関するデータをご提供いただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- Hall, R.W.: Travel Outcome and Performance the Effect of Uncertainty on Accessibility, Transportation Research, Vol.17B, No.4, pp.275-290, 1983.
- Small, K.A.: The Scheduling of Consumer Activities: Work Trips, The American Economic Review, Vol.72, No.3, pp.467-479, 1982.
- 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, No.22, pp863-864, 2005.