

通勤者の出発時刻と経路を考慮した 機関選択に関する行動分析*

柳沢 吉保**・飯田 恭敬***・内田 敬****

(平成7年9月27日)

Behaviour Analysis on Modal Choice Considering Departure Time and Route Choice

Yoshiyasu YANAGISAWA, Yasunori IIDA, Takashi UCHIDA

This paper examines the modal choice character during peak-period traffic congestion. It presents the utility function of road and rail way facilities services that consists of travel time and schedule delay at work start time and transit fares. To analyze traveler decisions, a nested logit model of departure times, route and mode choice was estimated. In this analysis, we used the Person Trip Data, from Suzaka City to the Nagano Central Business District.

1. はじめに

潜在的な交通需要が大きい今日、道路整備による交通渋滞の解消は期待できない。また整備までの期間が長期化したり、膨大な財源を必要とすることにも問題がある。一日に発生する交通需要の大きな割合を占めている通勤交通に対しては、時差出勤方式や公共輸送機関のサービス向上、さらに経路誘導などによって対応する方向にある。すなわち、ある特定の時刻と経路に集中していたトリップを、ピーク需要コントロールによって多の時刻、経路へ分散し渋滞を解消することを考えている。通勤者は、始業時刻の制約を考慮にいれた出発時刻や経路、手段の選択を行っている。そこで、ピーク需要コントロールによってトリップを分散させる方法を考えるにあたり、通勤者がどのようにして、手段・経路・出発時刻の選択を行っているかを究明する必要がある。

出発時刻選択問題に関する従来の研究では、ドライバーは出発から始業時刻までの実効旅行時間と、所要時間の変動により生ずる遅刻確率とのトレードオフを考慮していると仮定し、通勤実態調査より実効旅行時間と遅刻確率との関係を実証的に分析している¹⁾⁻³⁾。ただし、経路や手段も含めた同時選択行動まではふれていない。出発時刻や経路の同時選択行動をロジットモデルを用いて説明した研究がある⁴⁾⁻⁵⁾。これらは通勤効用関数をもとに交通行動を

* 平成7年1月第17回土木計画学研究講演会にて発表

** 環境都市工学科 講師

*** 京都大学工学部 教授

**** 京都大学工学部 講師

モデル化し、シミュレーションによって行動特性を分析している。このモデル化の概念を基本とし、通勤実態調査を用いて、出発時刻と経路選択行動を実証的に分析した研究がある⁹⁾。そこでは、NLモデルを用いて出発時刻、経路の選択ツリー構造を仮定し、モデルのパラメータを推定することによって、選択行動パターンを明らかにしている。ただし、手段選択まで考慮にいたった通勤行動特性までは分析していない。

本研究は、NLモデルを用いて道路と鉄道に対する交通行動の出発時刻、経路、手段選択のモデル化を行う。そして通勤実態調査結果を用いて、モデルのパラメータを推定し、通勤行動特性を明らかにする。

2. 通勤行動モデル

2-1 マイカー利用者の効用関数

ドライバーは、時刻 t_s に出発してから始業時刻 t_d までに費やす旅行時間損失と、所要時間の変動により生ずる遅刻ペナルティーを考慮して、出発時刻や経路の選択行動を行っていると考えられる¹⁰⁾。旅行時間損失と遅刻ペナルティーはトレードオフの関係にあるので、所要時間の変動が確率分布に従うとし、効用関数は(1)式のように表すことができる。

$$V(1, r, t_s | t_d) = \alpha_1 + \beta(t_d - t_s) + \gamma F(t_d | r, t_s) \quad (1)$$

$t_d - t_s$: 実効旅行時間 α_1 : 自動車固有の定数 β, γ : 不効用に関するパラメータ

$F(\cdot)$: 経路 r を利用するドライバーが、時刻 t_s に出発したときに、
始業時刻 t_d に遅刻してしまう確率

2-2 鉄道利用者の効用関数

鉄道利用の場合、イグレスとして徒歩や自転車の他に、自動車、バスなどを選択する可能性がある。自動車やバスを利用した場合、駅から会社までの旅行時間の変動も考慮しなければならず、モデルが複雑になる。ここではモデルを単純化するため、イグレスとして徒歩や自転車など、旅行時間の変動が無視できるほど小さい手段を選択した通勤者を対象とした効用を考える。

鉄道利用の場合も時間損失の項として、実効旅行時間が考えられる。しかし所要時間の変動は自動車利用と比較すると無視できるほど小さいので、勤務地の始業時刻に間に合うような列車を選択した場合、遅刻確率は0として扱う。一方、マイカー利用と異なり、車内混雑と乗車料金を不効用として考えねばならない。これらを考慮して、鉄道の効用関数は(2)式のように表すことができる。

$$V(2, r, t_s | t_d) = \alpha_2 + \beta(t_d - t_s) + \gamma' \delta(t_a | r, t_s) + \zeta f(r) + \eta C(r, t_s) \quad (2)$$

t_a : 勤務地への到着時刻 $f(r)$: 経路 r の乗車料金

$C(\cdot)$: 時刻 t_s に駅を出発する経路 r の列車の混雑率

α_2 : 鉄道固有の定数 ζ, η : 不効用に関するパラメータ

$$\delta(t_a | r, t_s) = \{1 : t_a > t_d, 0 : t_a \leq t_d\}$$

2-3 通勤行動モデル

通勤行動のモデル化は(1)、(2)式の効用関数に基づくロジットモデルを用いて行う¹¹⁾。選択ツリー構造は図-1に示す(a)、(b)、(c)の3種類を想定する。

図-1(a)の選択ツリーは、各通勤者の利用手段が完全に分離固定されていて、一方の手段

だけで出発時刻と経路選択が決定されている場合に適用される。出発時刻と経路の選択プロセスは既存の研究⁶⁾から、出発時刻を下位レベルとする方がモデル適合度がよいことがわかっているため、本分析でも(a)の選択ツリーを適用する。出発時刻と経路の同時選択確率は(3)式で計算できる。

$$p(r, t_s) = p(r) \cdot p(t_s | r) \quad (3)$$

図-1(b)の選択ツリーは各手段選択枝の類似性が比較的高く、通勤者が目的地までの選択可能な各手段の経路を一体として同時選択を行っている場合に適用される。ここでレベル2の選択枝数は、自動車の利用経路がR個、鉄道の利用経路がR'個ある場合(R+R')個となる。出発時刻と各手段経路の同時選択確率は(4)式より計算できる。

$$p(r, t_s) = p(r) \cdot p(t_s | r) \quad (4)$$

ただし、ここでのrは各手段の経路をすべて含む。図-1(c)の選択ツリーは手段選択枝間の類似性が低い場合に適用される。手段と経路の選択レベルを分け、最上位レベルを手段選択とした。出発時刻、経路、手段の同時選択確率は(5)式で求められる

$$p(m, r, t_s) = p(m) \cdot p(r | m) \cdot p(t_s | m, r) \quad (5)$$

以上のツリー構造を想定して、通勤不効用パラメータを推定する。

3. 対象ネットワークと使用データ

3-1 対象ネットワーク

本研究では、須坂市から長野駅周辺を中心業務地区に向かうトリップを分析の対象とする。ネットワークは図-2のように一般道路からなる2本の経路と1本の鉄道からなる。選定した2本の経路は、国道406号→18号→406号を経路1、国道406号→18号→19号を経路2とする。

3-2 使用データと通勤の実態

平成2年度長野都市圏パーソントリップ調査データを用いて通勤行動の実態を分析する。データは7:00から8:40の間に須坂市から発生する通勤目的のトリップを抽出し、それらの出発時刻、所要時間、トリップ数を調べた。通勤時間帯の到着分布を調べた結果、大半の鉄道利用

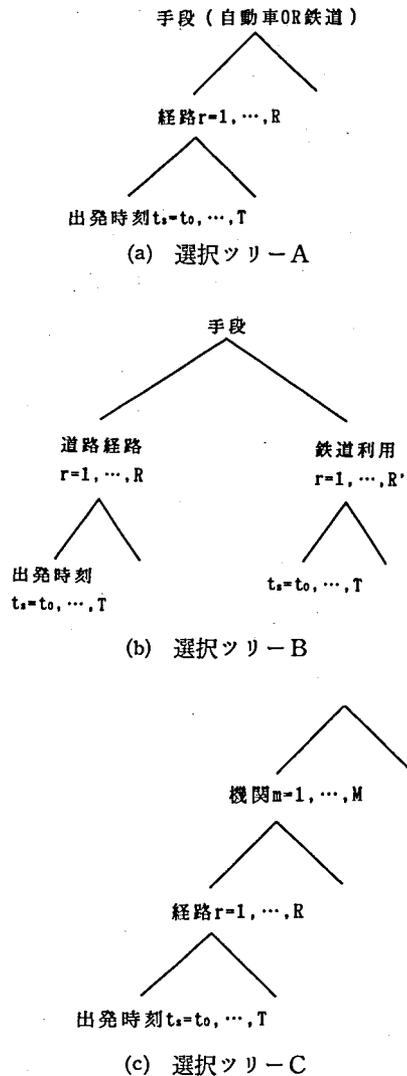


図-1 各選択枝の選択ツリー構造

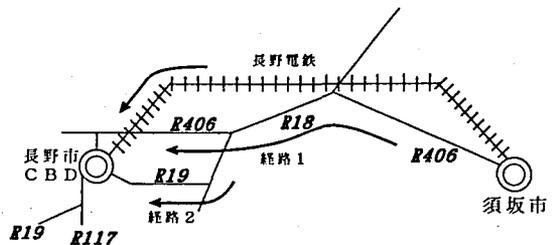


図-2 対象道路網

者が、8:00から8:10の間に長野市CBDの勤務先に到着していることがわかった。このためマイカー利用者も含めた通勤者のうち、8:00から8:10に勤務先に到着するトリップを通勤行動分析の対象にすることにした。効用パラメータの推定を行うために旅行時間と各経路を利用するトリップ数(台数)が必要となるが、このデータを得るための始業時刻と利用経路が不明である。そこで対象データの到着分布と各経路の所要時間より、始業時刻と利用経路を仮想的に与えることにする。

始業時刻は分析対象の通勤者の到着余裕時間が0から10分であると仮定し、到着時刻8:00から8:10のうち最も遅い到着時刻の8:10を始業時刻とした。

ドライバーを各経路へ配分する作業は、目的地までにかかった所要時間により行う。各経路の所要時間を、平成2年度全国道路交通情勢調査データより調べた。その結果、各ドライバーについて、所要時間の回答値が40分以下は経路1、41分以上は経路2を利用したと仮定して分けた⁹⁾。

鉄道利用者は、8:10の始業時刻に間に合うために、須坂駅を7:02、7:16、7:29、7:40に発車する4本の列車を利用するものとする。PTデータを用い、まず自宅から須坂駅までの所要時間から、須坂駅へ到着する時刻を算出し、これより長野電鉄の各列車の利用者数を求めた。鉄道利用の場合、須坂駅までのアクセスに複数の手段が選択されている場合が多く、アクセスも含めた通勤行動分析を行う場合、手段の組み合わせが複雑になってしまう。ここでは主要交通手段に絞った分析を行う目的から、鉄道利用者は須坂駅からの行動を分析の対象とする。以上の作業により、対象とする通勤者の各手段別出発時刻分布は図-3に示すとおりとなる。この図は7:05より10分間隔で、通勤者数を集計したものである。ただし、7:02、7:16、7:29、7:40発の列車はそれぞれ7:05~7:14、7:15~7:24、7:25~7:34、7:35~7:44の時間帯の中に含める。

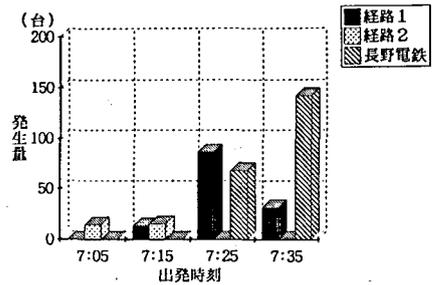


図-3 対象地域の出発時刻分布

PTデータから抽出した所要時間データより、7:05から7:44までの時間帯の各手段、経路の平均所要時間、標準偏差を表-1に示す。

発生時刻分布より、マイカー利用者は7:25~7:34台で発生トリップのピークとなり、7:35~7:44台では発生トリップ数が減少していることが分かる。7:35~7:44に出発すると始業時刻ぎりぎりに到着することになり、所要時間の変動も考慮すると遅刻の可能性が大きくなると考えられる。鉄道の場合は、目的地までの所要時間が短く、しかもその変動が小さいので、始業時刻にぎりぎり到着できるような列車が選択されやすいと考えられる。

次に、時間損失以外の要因として混雑率と出発分布との関係を見る。混雑率 $C(t_s)$ は、車両定員に近づくほど限界不効用が増加することを考慮して、次式のように定義する。

$$C(t_s) = \left\{ \frac{Y(t_s)}{C_p(t_s) \cdot L(t_s)} \right\}^2 \quad (6)$$

$Y(t_s)$: 時刻 t_s に須坂駅を出発する列車を利用する通勤トリップ総数

$C_p(t_s)$: 時刻 t_s に須坂駅を発車する列車の1両当たりの乗車定員

表-1 平均所要時間と標準偏差

経路	平均所要時間(分)	標準偏差
1	33.8	3.82
2	47.5	2.50
鉄道	20.0*	0.00

* CBDまでの平均所要時間

表-2 鉄道利用者の車内混雑

発車時刻	総利用者数	容量*	車両数	混雑率
7:02	14	130	3	0.001
7:16	123	130	2	0.223
7:29	313	100	3	1.089
7:40	551	140	3	0.968

* 1車両当たりの乗車定員

$L(t_s)$: 時刻 t_s に須坂駅を発車する列車の車両数

表-2より、通勤に利用されている7:29, 7:40発の列車の混雑率差は小さく、各列車とも大きな混雑は起こしていない。手段選択では、各手段の持つ固有の利便性が影響している場合も考えられるので、次章ではこの点を考慮し、各手段の所要時間とその変動、各手段の利便性、車内混雑が通勤行動に与える影響を分析する。

4. 通勤効用のパラメータ推定

4-1 パラメータ推定のためのデータの作成

通勤行動を分析するため、(1)(2)式で示した効用パラメータ $\alpha, \beta, \gamma, \xi, \eta$ とスケールパラメータ μ を推定する。

出発時刻の選択肢は道路、鉄道ともに7:05より10分間隔で7:05~14, 15~24, 25~34, 35~44の4つの時間帯を設けた。経路の選択肢は道路が2つで鉄道が1つである。手段は道路と鉄道の2つである。

表-3 選択肢の説明変数値

t_s	t_e	遅刻確率			f	C
		r_1	r_2	r_3		
7:05台	65	0	0	0	0.001	510
7:15台	55	0	0.002	0	0.223	510
7:25台	45	0.002	0.841	0	1.089	510
7:35台	35	0.377	1.000	0	0.968	510

t_s : 出発時刻, t_e : 実効旅行時間, r_1 : 経路1

r_2 : 経路2, r_3 : 長野電鉄, f: 混雑率, C: 乗車料

道路と鉄道の2つである。

長野電鉄の車内混雑は表-2に示したとおりであり、乗車料金は510円である。

手段、経路別の各出発時刻の発生量は図-3に示したとおりで、道路の経路1の総トリップ数が130、経路2が29、鉄道の総トリップ数が210であった。表-1で示した各手段、経路の所要時間と標準偏差を用いて、始業時刻

8:10に対する各選択肢の実効旅行時間と遅刻確率を求めておく。各トリップの代替選択肢の説明変数の値は表-3に示す。

4-2 パラメータの推定方法

図-1で示した選択ツリーで表されるロジットモデルの効用パラメータを、最尤推定法を用いて推定する。段階的にパラメータの推定を行うので、レベル1のスケールパラメータは1.0とした⁸⁾。よって図-1(a)(b)のように2段階推定の場合のスケールパラメータの存在範囲は、

$$0 < \mu_2 \leq 1.0 \tag{7}$$

でなければならない。また図-1(c)のように、3段階推定の場合、

$$0 < \mu_3 \leq \mu_2 \leq 1.0 \quad (8)$$

を満たさなければならない。

4-3 選択ツリーAのパラメータ推定結果の検討

図-1(a)選択ツリーAの、各手段ごとの経路と出発時刻の選択行動の分析を行う。ここでは各手段別にパラメータを推定するので、手段固有のパラメータは除くことにする。マイカ

表-4 選択ツリーAの推定パラメータ

式名称	手段	推定パラメータ
A ₁	自動車	β, γ, μ_2
A ₂ } A ₃ }	鉄道	β, η β, γ

表-5 パラメータ推定結果

式名称	β	γ	η	μ_2
A ₁	-0.166 (8.75)	-7.208 (9.40)	*	0.783 (7.31)
A ₂	-0.216 (0.30)	*	11.786 (0.198)	*
A ₃	-0.127 (10.63)	-11.986 (0.70)	*	*

(): t値 *: 除外

ー利用者の不効用パラメータは、表-4のA₁のように実効旅行時間と遅刻に関する β, γ である。推定結果は表-5に示されている。

推定されたパラメータの意味を、3節で作成した各手段、経路の発生時刻分布と対応させて考えてみる。マイカー利用者の発生分布は、出発時刻が7:15、7:25と実効旅行時間が短くなるほど発生トリップ数は増加している。実効旅行時間は長くなるほどトリップ数が減少するので不効用として作用し、 β の符号は負となっている。出発時刻がさらに早まり遅刻確率が増加すると、発生トリップ数は逆に減少している。したがって、遅刻確率が不効用として作用するので、 γ の符号も負となっている。レベル2の μ_2 は経路選択に関するパラメータである。 μ_2 の値は(7)式の範囲内に入っている。 μ は大きくなるほど不効用の小さい経路が選択される確率が高くなる特性を持っている。作成した発生分布では経路1にトリップ数が集中していた結果、 μ_2 の値が大きく推定された。

次に、鉄道利用者のパラメータ値を検討する。鉄道の経路は1つしかないので、選択肢は出発時刻だけとなる。説明変数は、実効旅行時間、遅刻確率のほかに車内混雑、乗車料金が考えられる。今回設定した4つの出発時刻の遅刻確率はどれも0.0で、乗車料金は510円としている。選択肢が出発時刻だけの場合、どの出発時刻に対しても遅刻確率や乗車料金が同じなので、これらのパラメータは0.0となる。そこでA₂では実効旅行時間と車内混雑のみを説明変数とする。

鉄道の利用者数はマイカー利用と同様に、実効旅行時間が短くなるにつれて多くなるので、 β の符号は負となっている。車内混雑に関するパラメータ η の符号は正となっている。通常、不効用は車内混雑が増加するほど大きくなるので、符号は負とならなければならない。各発車時刻の混雑率を見ると、7:25と7:35発の列車の混雑率の差は小さい。7:25と7:35発の実効旅行時間差の方が、混雑率差より発車時刻選択に大きく影響した結果、混雑率が不効用として働かずに、 η の符号が非現実的になってしまっていると考えられる。このことからレベル1のパラメータ推定では、鉄道利用についても、出発時刻と経路選択の説明変数は実効旅行時間と遅刻確率のみを用いることにする。

A₃は、遅刻確率がすべての出発時刻で0.0とにならないようにするため、CBDの始業時刻に遅刻してしまう列車の発車時刻として7:45をさらに設定し、この時刻の遅刻確率を1.0とした。表-5の結果をみると、遅刻に関するパラメータ γ のt値は低い β 、 γ の符号は現実的であり、説明変数として実効旅行時間と遅刻確率を用いることが妥当であることが分かる。

4-4 選択ツリーBのパラメータ推定結果の検討

図-1(b)選択ツリーBは各手段も1つの経路とみなして行動する場合を想定している。推定するパラメータは表-6に示す。前に述べたとおり、出発時刻選択であるレベル1の説明

表-6 選択ツリーBの推定パラメータ

式名称	推定パラメータ			
	レベル1		レベル2	
	β	γ	α_2	ζ
B ₁	β, γ	α_2, ζ	μ_2	
B ₂	β, γ	ζ	μ_2	
B ₃	β, γ	α_2	μ_2	

表-7 パラメータ推定結果

式名称	レベル1		レベル2		
	β	γ	α_2	ζ	μ_2
B ₁	-0.145 (15.08)	-6.570 (11.26)	-16.323 (0.57)	83.842 (0.56)	0.878 (7.31)
B ₂	-0.145 (15.08)	-6.570 (11.26)	*	0.117 (2.80)	0.878 (7.31)
B ₃	-0.145 (15.08)	-6.570 (11.26)	0.594 (2.80)	*	0.878 (7.31)

(): t 値 * : 除外

変数は実効旅行時間と遅刻確率を用いた。レベル2ではスケールパラメータ、乗車料金、鉄道の固有パラメータを導入した。推定計算の収束性の関係上、乗車料金と鉄道の固有パラメータを不効用として、それぞれの説明変数値を-5.1(100円を1.0)、-1として与えた。推定結果は表-7に示す。

B₁~B₃のレベル1のパラメータ β 、 γ の値は符号が負であり、現実現象と整合しているという点で合理的である。A₁と比較し、B₁~B₄の β 、 γ は大きく推定された。ピーク発生時刻はマイカー利用者で7:25、鉄道利用者で7:35に生じており、ツリー構造Aのときと比較しトリップ発生時刻分布のばらつきが大きいのである。ただしA₁では $\beta:\gamma=1:43$ 、B₁~B₄では $\beta:\gamma=1:45$ で、選択ツリーBの γ/β 比が大きい。これは鉄道利用者のピーク発生時の遅刻確率が0で、全体として遅刻確率が小さい出発時刻が選択されているためである。

レベル2について、B₁では乗車料金、固有パラメータのt値はともに0.5で低い値となった。B₂では乗車料金はパラメータの符号より不効用となり、 μ_2 が(7)式の範囲内にあるため合理的な結果となった。B₃は、固有パラメータ α_2 が不効用と推定されたことから、時間損失以外の面では鉄道よりも自動車を利用する方がメリットが大きいことを示している。しかし α_2 値は0.594であり、時間損失による不効用と比較してかなり小さく、通勤行動には大きく影響はしないと考えられる。また、交通政策の計画変数として取り入れにくいことから、以下のモデルでは固有パラメータを除外する。

4-5 選択ツリーCのパラメータ推定結果の検討

図-1(c)選択ツリーCでは推定手順は手段と経路選択を明確に分け、最下位レベルを手段選択とした3レベルからなっている。推定するパラメータは表-8に示す。出発時刻と経路

表一8 選択ツリーCの推定パラメータ

式名称	推定パラメータ		
	レベル1	レベル2	レベル3
C ₁	β, γ	μ_2	ζ, μ_3
C ₂	β, γ	μ_2	μ_3

表一9 パラメータ推定結果

式名称	レベル1	レベル2	レベル3		
	β	γ	μ_2	ζ	μ_3
C ₁	-0.145 (15.08)	-6.570 (11.26)	0.878 (7.31)	4.518 (0.05)	2.598 (0.05)
C ₂	-0.145 (15.08)	-6.570 (11.26)	0.878 (7.31)	*	0.280 (2.65)

(): t値 * : 除外

選択は図一1(a)と同様に、レベル1の説明変数は実効旅行時間と遅刻確率を、レベル2ではスケールパラメータを用いる。手段選択であるレベル3の説明変数は、スケールパラメータと乗車料金とする。推定結果は表一9に示す。

C₁は、レベル3のスケールパラメータ μ_3 が(8)式の存在範囲内とならなかった。

C₂の推定結果を分析する。レベル1のパラメータ推定で用いられるデータは、選択ツリーBと同じなので β, γ の値もB₁~B₃と同一となる。レベル2の経路選択に関するパラメータ μ_2 は、鉄道の経路が1本なので、ここでは道路の経路選択に関するパラメータとなる。旅行時間損失に関する不効用が小さい経路にドライバーが集中しているため、 μ_2 は0.878と大きな値となっている。

レベル3の μ_3 は機関選択に関するスケールパラメータである。 μ_3 は(8)式の範囲内にあるが、0.280と比較的小きな値を示した。レベル3のログサム変数はレベル1の実効旅行時間と遅刻損失による不効用が反映される。今回設定した列車を利用した場合、遅刻する危険はなく、しかも時間損失が小さいので、マイカーを利用するより鉄道を利用した方が通勤不効用は小さくなる。しかし道路と鉄道の利用者数の比率は159:210で、時間損失差ほど利用者数が鉄道にかたよっていない。それゆえ μ_3 の値は比較的小きな値となっている。このことは、各手段、経路の所要時間が短くなくても手段選択が大きく変動することはないことを示していて、各通勤者の利用手段はある程度固定されており、所要時間の変動に対し出発時刻で対応していると解釈できる。

5. おわりに

本研究で得られた結論は以下のようにまとめられる。まずパラメータの推定値より、次のように結論できる。

- (1) 手段選択に関するスケールパラメータが比較的小さいことから、各通勤者の利用手段はある程度固定されていて、所要時間の変動に対し出発時刻で対応しているものと考えられる。
- (2) マイカー利用者だけのときと比較し、鉄道利用者も含めたパラメータ推定では遅刻に関する γ の絶対値が小さいことから、通勤者は実効旅行時間損失を重視していることが分かった。
- (3) 10分という比較的大きな間隔で出発時刻選択行動を見た場合、各出発時刻の混雑率差よりも、実効旅行時間損失差の方が選択行動に与える影響は大きい。

- (4) 推定した鉄道の固有定数が不効用となった。よって、時間損失以外の面で、鉄道は自動車よりも利便性が悪いことがわかった。ただし旅行時間損失による不効用の大きさと比較し、固有定数不効用は小さい。

参 考 文 献

- 1) Hall, R.W.: Travel outcome and performance: The effect of uncertainty on accessibility, Trans.Res.-B Vol.17B, No.4, pp. 275-290, 1983.
- 2) 松本昌二, 白水義晴: 旅行時間の不確実性が時刻の指定された物資輸送に及ぼす影響, 土木学会論文集 第353号/IV-2 pp. 75-82 1985年1月
- 3) 内田 敬, 飯田恭敬, 松下 晃: 通勤ドライバーの出発時刻決定行動の実証的分析, 土木計画学研究・論文集, pp. 39-46, No.10, 1992年11月
- 4) Ben-Akiva: Dynamic Model of Peak Period Traffic with Elastic Arrival Rates, Trans. Sci. Vol.20, No.2, pp. 164-181, 1986.
- 5) 飯田恭敬, 柳沢吉保, 内田 敬: 通勤交通の経路選択と出発時刻分布の同時推定法, 土木計画学研究・論文集, No.9 pp. 93-100, 1991年11月
- 6) 飯田恭敬, 柳沢吉保, 内田 敬: 通勤ドライバーの出発時刻と経路の同時選択に関する行動分析, 交通工学, Vol.28 No.6 pp. 11-20, 1993
- 7) 飯田恭敬: 交通管理のハイテク化と都市交通計画, 都市問題研究, Vol.41, No.12, pp. 3-15, 1989
- 8) 原田 昇: 非集計行動モデルによる多次元選択行動の分析, 土木計画学研究・論文集 No.4 pp. 15-27, 1986年10月