

遅刻ペナルティを考慮した経路選択行動の実験分析*

Experimental Study on Route Choice Behavior considering Delay Penalty*

ビュン ワンヒ**・飯田恭敬***・宇野伸宏****・金周顯*****

Wanhee Byun**・Yasunori Iida***・Nobuhiro Uno****・Juhyun Kim*****

1. はじめに

遅刻を考慮した経路選択行動に関する研究は、これまで多くの研究がなされている。例えば、Adler等¹⁾は、“運転者は、交通目的を達成する（予定到着時刻までに合う）可能性が最も高い経路を選択し、経路変更は現経路によってその目的を達成できない（遅れる）ことが認識されたときのみ行われる”と述べている。また、羽藤等²⁾は、“走行前から完了するまでの間に経路の効用（経路についての選好程度）は時間経過に従って変化する”という行動的不均衡概念にもとづいた経路選択モデルを提案している。山下等³⁾は、空港への交通トリップを対象に、遅刻を極力回避するための出発時刻選択モデルを提案している。また飯田等⁴⁾は、通勤交通を対象に遅刻ペナルティを考慮した出発時刻と経路選択の同時選択モデルを提案している。

このように、経路選択行動についてはこれまで数多くの研究がなされてきたが、ドライバー特性は同質であるとして取り扱われているのがほとんどである。しかしながら、現実におけるドライバー特性は多様であり、その構成比率によって道路交通流の状況が異なってくることが考えられる。とりわけ遅刻ペナルティが課せられる場合、ドライバーの時間価値の大きさが、経路選択行動に顕著な影響を及ぼすと思われる。

そこで本研究では、ドライバーの時間価値が高いグループと低いグループの2種類があると仮定して、実験計画法を用いたアンケート調査により、経路選択行動の実験分析を行ったものである。そして、前者のドライバーは高ペナルティ、後者は低ペナルティとして、経路選択行動のモデル化を行い、その有効性を検証している。また、代替経路として有料道路があるとき、遅刻ペナルティを考慮したモデルを適用すると、時間価値の高いドライバーが増大するにともなって、道路交通状況がどのように改善されるかを、本モデルにもとづいたシミュレーション実験で分析している。

2. アンケート実験による経路選択行動データの収集と分析結果

(1) アンケート実験によるデータ収集

遅刻ペナルティの高低による経路選択行動の差異を分析するためにアンケート実験を実施した。実験においては、到着時間制約の強さで、被験者にペナルティの大きさを認識してもらうように意図しており、以下のような2種類のトリップ状況を想定した。

- 遅刻ペナルティが高かいトリップ:海外出張のために60分以内に空港に到着しなければならない場合
- 遅刻ペナルティが低いトリップ:60分後に友達とデパートの売り場で待ち合わせする場合

被験者は高速道路と一般道路のいずれかが選択可能であり、経路選択を決定するための道路交通情報の内容としては表-1に示すように、高速道路に対しては、平均所要時間と最大所要時間、通行料金、また一般道路に対しては平均所要時間と最大所要時間としている。最大所要時間は平均所要時間に遅延時間を加算することによって与えている。ここで、各情報内容とも3レベルとなっている。

表-1 アンケート実験での提供情報

提供情報 対象道路	平均 所要時間 (分)	最大 遅延時間 (分)	通行料金 (円)
高速道路	35, 45, 55	5, 10, 15	0, 500, 1000
一般道路	45, 55, 65	5, 10, 15	0

この経路選択実験は3レベル5要因の実験タイプであるため、実験計画法を適用すると、27通りの要因別レベルの組合せによるアンケート実験となる。またこの実験では、28名の被験者がそれぞれペナルティの高低別にランダムに9通りのアンケートに回答するように実施した。したがって、収集した実験データの総数は504個である。

アンケート実験における要因別レベルの組合せ内容は、平均所要時間と最大所要時間で所要時間分布が形成されると仮定すると、以下のような4個のカテゴリに分類す

*Keywords : 交通情報, 経路選択行動, 遅刻ペナルティ

**正員, 修士, 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻
(606-8501, 京都市左京区吉田本町, TEL: 075-753-5125, FAX: 075-753-5907)

***フェロー, 工博 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻

****正員, 工博 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻

*****正会員, 安養大 都市情報工学科交通工学専攻 (Anyang University, Korea)

ることができる。

① カテゴリ 1

高速道路の所要時間分布が一般道路のそれより左側に位置し(より速いことを意味する)、高速道路の通行料金は0円である。

② カテゴリ 2

高速道路の所要時間分布が一般道路のそれより左側に位置し、高速道路の通行料金は500円である。

③ カテゴリ 3

高速道路の所要時間分布が一般道路のそれより左側に位置し、高速道路の通行料金は1000円である。

④ カテゴリ 4

高速道路の所要時間分布が一般道路のそれより右側に位置する(より遅いことを意味する)か、あるいは所要時間分布が同じで高速道路の通行料金が500円以上である。

(2) 交通状況別に見たアンケート結果の概略

4個のカテゴリごとにアンケート結果の概略をまとめたのが表-2である。カテゴリ1では、高速道路の方が早く、しかも無料なので、ペナルティの高低にかかわらず、高速道路の選択率(平均値)が極めて高く、そのばらつき(標準偏差)も小さいものとなっている。しかし、カテゴリ2およびカテゴリ3になると、ペナルティの高低間で高速道路の平均選択率に差が大きくなり、そのばらつきの違いも大きくなる。この理由は、高速道路は所要時間が短い、通行料金が増えるとともに高速道路利用のメリットが小さくなり、高速道路の選択率が低下するからである。加えて、ペナルティの高低による影響感が効いてくるのが推察される。カテゴリ2からカテゴリ3になると、高速道路料金が高くなるので、その影響は一層顕著となる。カテゴリ4は、一般道路の所要時間の方が短い、あるいは同じなので、料金を払って高速道路を利用しても利益がないので、当然のことながら、ペナルティの高低に関係なく高速道路の利用率は極端に低くなる。

このように、カテゴリ別に見たアンケート実験の概略は妥当な結果を示しており、有効であると判断できる。

表-2 アンケートの結果についての妥当性の検討

ペナルティ	カテゴリ 1	カテゴリ 2	カテゴリ 3	カテゴリ 4	
高	$n(E)$	56	57	43	6
	$n(P)$	62	70	64	56
	\bar{X}	0.90	0.81	0.67	0.11
	s	0.079	0.179	0.218	0.077

低	$n(E)$	64	21	10	6
	$n(P)$	70	62	64	56
	\bar{X}	0.91	0.34	0.16	0.11
	s	0.079	0.188	0.117	0.122
標本数(n)		7	7	7	6

* $n(E)$:高速道路の選択者数, $n(P)$:総回答者数

\bar{X} :高速道路の平均選択率, s :標準偏差

3. アンケート結果の統計的検定

上のアンケート結果の概略においては、カテゴリ1では高速道路、カテゴリ4では一般道路を利用するのが有利であるため、遅刻ペナルティの高低の間で高速道路選択率に差は見られなかった。しかし、カテゴリ2と3では、遅刻ペナルティの高低によって、高速道路利用率に差が大きくなっている。この結果の妥当性を統計的検定によって確かめておく。有意水準(α)は0.05とし、両側t検定を行った。

検定結果は表-3に示すように、カテゴリ1とカテゴリ4に対して、遅刻ペナルティの高低間での高速道路の選択率が同じであるとする帰無仮説は棄却されなかった。したがって、両者間の経路選択率には差がないと見なしてよい。一方、カテゴリ2とカテゴリ3に対して帰無仮説は棄却され、遅刻ペナルティの高低間で経路選択行動に差異があると判定される。

表-3 カテゴリごとの経路選択行動のt検定結果

	カテゴリ 1	カテゴリ 2	カテゴリ 3	カテゴリ 4
自由度	12	12	12	10
検定統計量	-0.455	4.376	4.929	0
棄却領域	2.179	2.179	2.179	2.228
検定結果	非棄却	棄却	棄却	非棄却

4. 遅刻ペナルティを考慮した経路選択行動モデル

(1) モデルの作成

経路選択のモデル化は、式(1)に示すロジットモデルを用いて行うことにする。ここでは、遅刻ペナルティを考慮するモデル1と、考慮しないモデル2の2つのタイプについて検討する。各モデルの効用関数は式(2)と式(3)、および式(4)と式(5)に示している。

$$P(p_m = 1) = \frac{\exp(U_{1,m} - U_{2,m})}{1 + \exp(U_{1,m} - U_{2,m})} \quad (1)$$

① モデル1: ペナルティを考慮する効用関数

$$U_{1,m} = \theta_0 + \sum_{k=1}^K [\delta_m \theta_{k,PB} + (1 - \delta_m) \theta_{k,PS}] x_{k,m}^1 \quad (2)$$

$$U_{2,m} = \sum_{k=1}^K [\delta_m \theta_{k,PB} + (1 - \delta_m) \theta_{k,PS}] x_{k,m}^2 \quad (3)$$

② モデル2：ペナルティを考慮しない効用関数

$$U_{1,m} = \theta_0 + \sum_{k=1}^K \theta_k \cdot x_{k,m}^1 \quad (4)$$

$$U_{2,m} = \sum_{k=1}^K \theta_k \cdot x_{k,m}^2 \quad (5)$$

ここで、

$P(p_m = r)$ ：個人mが経路rを選択する確率

$U_{r,m}$ ：個人mの経路rに対する効用

θ_0 ：経路1に対する固有パラメータ

$x_{k,m}^r$ ：個人mの経路rに対するk項の説明変数、k=1は平均所要時間、k=2は最大所要時間、k=3は通行料金

δ_m ：個人mのペナルティを説明する0-1変数、 $\delta_m = 0$ のときは、高ペナルティ、 $\delta_m = 1$ のときは低ペナルティ

$\theta_{k,PB(PS)}$ ：ペナルティが高い(低い)状況でのk項の変数

に対するパラメータ、PBは高ペナルティ、PSは低ペナルティ

(2) パラメータの推定結果

モデルのパラメータは最尤推定法によって求め、変数抽出の有意性判定はワルド検定法を用いた。

最尤推定法により得られたモデル構造式は、式(6)から式(9)のようになる。なお、このモデル式の決定において、平均所要時間、平均所要時間と最大所要時間の差、最大所要時間と通行料金の交互作用、平均所要時間と通行料金等の交互作用は、ワルド法 (Wald test) では統計的に有意とはならなかった。

① モデル1

$$U_{1,m} = 0.2990 + \delta_m(-0.1443x_{2,m}^1 - 0.00127x_{3,m}^1) + (1-\delta_m)(-0.0747x_{2,m}^1 - 0.00356x_{3,m}^1) \quad (6)$$

$$U_{2,m} = \delta_m(-0.1443x_{2,m}^2) + (1-\delta_m)(-0.0747x_{2,m}^2) \quad (7)$$

② モデル2

$$U_{1,m} = 0.2614 - 0.0887x_{2,m}^1 - 0.00197x_{3,m}^1 \quad (8)$$

$$U_{2,m} = -0.0887x_{2,m}^2 \quad (9)$$

(3) 両モデルの優劣比較

表-4で見られるように、モデル適合度の有意性検定のために尤度比カイ自乗検定(Likelihood ratio chi-square test)を行った。モデル間の適合度比較は、各モデルの説明変数と標本数が異なる場合に有用なAkaike情報基準(Akaike's Information Criterion, AIC)を用いた。また、モデルの推定精度は、グラフで表現するROC曲線(receiver operating characteristic curve)から求められるc統計量を用いて比較評価する。これらの結果は表-4に示している。

表-4 モデル間の比較のための統計量

モデル	尤度比カイ自乗検定	AIC	C
1	$LR(= 248.54) > \chi_{0.05,df=4}^2(= 9.49)$	0.911	0.875
2	$LR(= 165.89) > \chi_{0.05,df=2}^2(= 5.99)$	1.067	0.820

尤度比カイ自乗検定統計量によれば、有意水準0.05で2つのモデルは、すべて有意であると判定される。また、モデル適合度の比較については、ペナルティを考慮するモデル1の方が、考慮しないモデル2と比べて優れていることが示されている。

5. ペナルティと時間価値の関係

ペナルティの高低が時間価値とどのような関係になるかについて分析する。経済学の限界代替率²⁾にもとづいて、ここでは式(10)に示すように、通行料金と最大所要時間の関係で時間価値を分析する。したがって、本実験での時間価値は、“同一の効用下で、ドライバーが目的地までの所要時間短縮のために支払う意思がある単位時間あたり通行費用”、定義することができる。

$$MRS = - \frac{\Delta x_3}{\Delta x_2} \quad (10)$$

ここで、

MRS： 時間価値(同一効用での最大所要時間と通行料金の限界代替率)

Δx_2 ： 最大所要時間の微小変化

Δx_3 ： 通行料金の微小変化

なお、式(10)の負号は限界代替率を正で表す便宜的なものである。

この時間価値を求めるために、モデルで、ペナルティの大きさごとに効用を固定させた状態で最大所要時間と通行料金の関係性を求め、これをグラフで表現すると、図-1のような無差別曲線になる。式(11)は例として、モデル1の式(6)で高ペナルティについて最大所要時間と通行料金の関係式を示したものである。

$$0.1443x_{2,m}^1 + 0.00127x_{3,m}^1 = 0.2990 - U_{1,m} \quad (11)$$

この図で傾きが時間価値であり、その結果を見ると、モデル1での時間価値は、高ペナルティのとき、113.6円/分、低ペナルティのとき、21.0円/分となる。このように、遅刻ペナルティが高くなるほど時間価値が高くなること、実験データからも確認されたことになる。モデル2では、遅刻ペナルティが考慮されていないが、時

間価値は遅刻ペナルティ高と低に対する中間に位置する45.0 円/分となる。

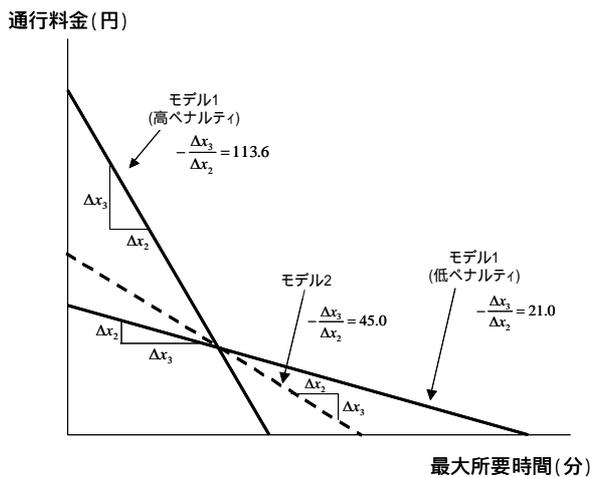


図-1 遅刻ペナルティと時間価値の関係

6. 遅刻ペナルティを考慮したシミュレーション分析

遅刻ペナルティを考慮したモデル1を用いて、経路選択シミュレーションを実施し、道路ネットワークの交通流状況がどのように変化するか分析した。このシミュレーション分析における交通需要は、遅刻ペナルティが高かいトリップと低いトリップの2種類で構成されているとした。道路ネットワークは単一ODの間に経路（長さ10km）が2本存在し、一方は有料（500円）の高速道路、他方は無料の一般道路とする。時刻別の発生交通量は台形状で与えている。

遅刻ペナルティが高かいトリップの構成比率を0から1まで変化させて、道路ネットワーク全体としての平均所要時間の結果を図-2に示している。

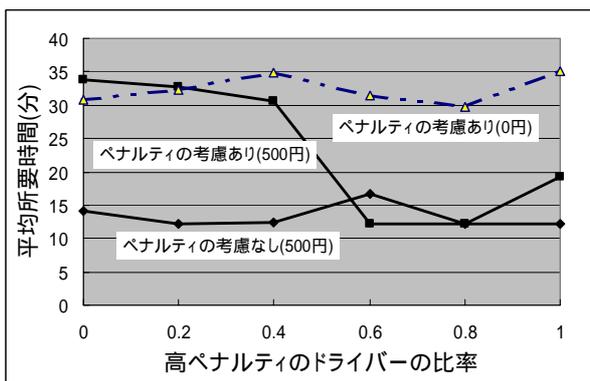


図-2 高ペナルティのドライバー比率と平均所要時間の関係

この結果は、遅刻ペナルティを考慮した経路選択モデルを用いると、時間価値の高いドライバー比率がある程度増大すると、平均所要時間が減少して、道路ネット

ワークの交通流状況は改善されることが示されている。この理由は、時間価値の高いドライバーは、一般道路が混雑すると、遅刻ペナルティを嫌って有料の高速道路を利用するようになり、その結果、両経路の交通量の均等化が進むからである。一方、モデル2を用いたシミュレーション実験では、時間価値の高いドライバー比率が増大しても、平均所要時間に変化はほとんど見られない。

また、高速道路が無料の場合のシミュレーションを実施して有料の場合との差を比較してみた。この結果で興味深いことは、時間価値の高い道路利用者が存在するとき、特に、出勤時間帯のような高ペナルティドライバーの比率が高いときは、高速道路を有料にするものの社会的意義が示されていることである⁷⁾。

7. 結論

本研究は、遅刻ペナルティの大きさがドライバーの時間価値を表すとして、その経路選択特性をアンケート実験によって分析考察した。その結果、遅刻ペナルティがドライバーの経路選択行動において大きな影響を及ぼすことが明らかとなり、遅刻ペナルティを考慮した経路選択モデルが有用であることを示した。さらに、このモデルを用いたシミュレーション実験の結果、道路ネットワークが有料高速道路と無料一般道路から成るとき、遅刻ペナルティが高い、すなわち時間価値の高いドライバー比率がある程度増大すると、道路交通流の状況が改善されることが示された。このことは高速道路が有料であることの社会的意義が確認されたといえる。

参考文献

- 1) Jeffrey L. Adler, Wilfred W. Recker, Michael G. McNally, A Conflict Model and Interactive Simulator (FASTCARS) for Predicting Enroute Driver Behavior in Response to Real-Time Traffic Condition Information, Published in Transportation, 20, pp.83-106, 1993.
- 2) 羽藤英二, 朝倉康夫, 柏谷増男, 複数情報リソース下における行動的不均衡を考慮した経路変更モデル, 土木学会論文集, No. 653/IV-48, 51-61, 2000. 7.
- 3) 山下智志, 黒田勝彦, 交通機関の定時性と遅刻回避形効用関数, 土木学会論文集, No.536/IV-31, pp. 59-68, 1996.
- 4) 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.
- 5) 飯田恭敬, 道路交通情報ビジネス発展への期待, 警察学論集第55巻第7号, pp1-16, 2002.
- 6) Moshe Ben-Akiva, Steven R. Lerman, Discrete choice model, the MIT press, eighth printing, 2000.
- 7) ビョンワンヒ, 飯田恭敬, 宇野伸宇, 金周顯, ドライバー特性を考慮したシミュレーション実験による料金効果分析, 交通工学研究発表会, 2003.