

利用者間の相互依存性に着目した ETC 車載器普及モデル*

A Diffusion Model of ETC In-Vehicle Transmitters focusing on the Interdependence among Users' Behaviors*

福田大輔**・渡邊健***・屋井鉄雄****

By Daisuke FUKUDA**, Takeshi WATANABE*** and Tetsuo YAI****

1. はじめに

我が国では、2001年3月より、ETC (Electronic Toll Collection System) の本格的な実用化が開始された。ETC 導入により、料金支払いの効率化、料金所通過時間の短縮、料金所における渋滞削減等が期待されている。しかし、ETC 車載器 (以下、車載器) の普及台数に関しては、ようやく全国で100万台 (セットアップ台数、2003年6月10日現在) を超えたものの、対自動車保有台数比で見ると約1.3%弱に留まっており、普及が迅速に進んでいるとは必ずしも言い難い。ETC 導入に伴う各効果が顕著に表れていないのが現状であり、車載器の普及促進を早急に行う必要性が随所で指摘されている。

ETC システムが効果的に運用されるためには、ETC 対応料金所のような社会基盤の整備水準が、当該時点での車載器需要に適応していること (例えば、普及率80%なのに料金所の大半がマニュアル専用レーンであった状況を生じさせない等)、すなわち、基盤整備の供給と車載器の普及が協調的に進行しなければならない。

このように、需要に見合った基盤整備が行われると仮定すれば、車載器が普及するにつれて料金所での待ち時間が節約され、利用者の車載器保有に対する効用が増大すると考えられる。その結果、個人の車載器購入行動が促進され、さらに車載器普及率が増加する。このように、システムの利用者が多いほど個々の利用者が享受する便益が多くなるという性質を持っていることから伺えるように、ETC はネットワーク外部性を有する財と解釈することができる。一方、普及が低迷したままであれば、料金所での待ち時間も削減されず、結果として購入行動も滞って車載器普及が進まないまま、低普及の状態が需要が停滞する状況も起こり得ると考えられる。

消費者間相互依存性を有する財の場合、状況によっては、得られる需要や便益に複数の安定状態が存在することが従来指摘されている¹⁾。また、新規サービスが低普及率で停滞する現象は、“立ち上がり問題 (Start-up Problem)” と言われ^{1),2),3)}、複数の安定した需要レベルのうち、低普及の状態に膠着してしまう場合である。車載器市場が、このような立ち上がり問題に直面しているのか否か、直面しているとした場合、どのようにしてそのような状況から脱却して普及が促進し得るのかを検討することは重要と思われる。

以上の問題意識に基づき、本研究では車載器普及率と車載器パフォーマンスの相互依存性を考慮した個人の車載器購入行動モデルを構築し、これをマクロな普及予測モデルへと展開して、普及促進政策の影響分析を行う。

2. 車載器購入行動のモデル化

(1) モデル化の前提条件

個人の車載器購入行動モデルは、Brock and Durlauf⁴⁾ に基づいて福田他⁵⁾ が定式化したものを、さらに、逐次的な意思決定行動を表現するように拡張したものである。モデル構築に際しての前提条件を整理する。

- ・個人は、車載器を購入するかどうかの検討段階に至っており、車載器を“購入する”、“購入しない”という2値選択を行うとする。
- ・離散時間での逐次的な購入意思決定状況を想定する。
- ・個人の車載器購入に影響を及ぼす要因として、購入費用や自動車利用特性等の“私的要因”と、システム利用者数によって規定されるETCサービスのパフォーマンス等といった“社会的要因”を想定する。また、この社会的要因は、直前期の普及率の実績値に基づいて規定されるものとする。

(2) 定式化

t 期における個人 i の ETC 車載器購入、非購入に対する効用関数をそれぞれ以下のように特定化する。

$$V_{ETC,i,t} = u_{i,t} + \gamma S_{t-1} + \varepsilon_{ETC,i,t} \quad (1)$$

$$V_{NON,i,t} = -u_{i,t} + \gamma(1 - S_{t-1}) + \varepsilon_{NON,i,t} \quad (2)$$

ここで、 $V_{ETC,i,t}$: 個人 i が t 期に車載器を購入することによって得る効用、 $V_{NON,i,t}$: 個人 i が t 期に車載器を購入しないことに対する効用、 $u_{i,t}$: 個人 i が t 期に車載器を購入する影響のうち私的動機のみ依存する確定項、 S_t : t 期における市場全体の車載器普及率、 $\varepsilon_{ETC,i,t}$ 、 $\varepsilon_{NON,i,t}$: 私的動機のみ依存するランダム項、 γ : ネットワーク外部性の影響度を表すパラメータである。

*Keywords: ETC 車載器, 消費者間相互依存, 普及モデル, 立ち上がり問題

**正会員 修(工) 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻

(〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1 Tel: 03-5734-2693 Fax: 03-5734-3578)

***非会員 修(工) 八千代エンジニアリング株式会社

(〒153-8639 目黒区中目黒1-10-21 TEL: 03-3715-1231 Fax: 03-3710-5910)

****正会員 工博 東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻

(〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1 Tel: 03-5734-2693 Fax: 03-5734-3578)

次に、式(1), (2)より、購入した場合 t 借でない場合との効用差 $\Delta V_{i,t}$ を求める。

$$\begin{aligned}\Delta V_{i,t} &= V_{ETC,i,t} - V_{NON,i,t} \\ &= 2u_{i,t} + J(2S_{t-1} - 1) + \varepsilon_{i,t}\end{aligned}\quad (3)$$

ここで $\varepsilon_{i,t} = \varepsilon_{ETC,i,t} - \varepsilon_{NON,i,t}$ である。 $\varepsilon_{ETC,i,t}$, $\varepsilon_{NON,i,t}$ が独立かつ同一のガンベル分布に従うとし、意思決定に関するコミュニケーションや取り決めを個人間で行うことがないとすれば、個人 i の t 期における車載器購入確率 $P_{i,t}$ は、以下の2項ロジット式で表される (β : スケールパラメータ)。

$$P_{i,t} = \{1 + \exp[-2\beta u_{i,t} - \beta J(2S_{t-1} - 1)]\}^{-1}\quad (4)$$

3. 車載器普及過程のモデル化

(1) 変数の定義

前節で導出した式(4)をマクロな普及モデルに展開する。まず、ある t 期の車載器市場は、車載器の既保有層と非保有層に分けられる。ここで、 t 期の期末における既保有層のシェアを S_t と表す。これは、 t 期末における車載器の普及率である。

次に、 t 期に ETC 車載器を保有すると見込まれる利用者を、“ t 期における潜在的な車載器購入需要” と称し、この市場全体に対するシェアを D_t とする。但し D_t は、 t 期期首における“潜在需要”であり、 t 期終了時点でそれがそのまま顕在化して、需要シェア増分の実現値である $S_t - S_{t-1}$ ($\equiv \Delta S_t$) に一致するとは必ずしも限らない。

(2) 定式化

以上の諸変数間の関係を定式化し、車載器の普及メカニズムを定式化する。ここでは Matsuyama⁶⁾ の考えに基づき、需要増分の実現値 ΔS_t が、 t 期における潜在的購入需要 D_t と前期の車載器普及率 S_{t-1} によって規定されるような構造を考え、以下のような特定化を行う。

$$\Delta S_t = \rho(D_t - S_{t-1})\quad (5)$$

ここで、 ρ ($0 < \rho < 1$) は、消費者が実際に車載器の購入行動を行うまでのタイムラグを表すパラメータと解釈できる。これを“普及速度係数”と呼ぶこととする。

次に、潜在的な購入需要 D_t の特定化を行う。既往研究^{7),8),9)}では、車載器を耐久消費財(1度購入した消費者は購入行動を行わない)と見なして特定化を行っている。一方本研究では、車載器の普及が低位で膠着する可能性を排除しないために、車載器を1度購入した消費者も再度購入行動を行うと考える。すると、 D_t は式(4)で表される個人の購入確率を集計化して求まる P_t に等しくなる。

$$D_t = S_{t-1}P_t + (1 - S_{t-1})P_t = P_t\quad (6)$$

例えば、平均値法に基づいて P_t を算出すると、式(5)は以下のように再定式化される (\bar{u}_t : $u_{i,t}$ の平均値)。

$$\Delta S_t = \rho\{1 + \exp[-2\beta\bar{u}_t - \beta J(2S_{t-1} - 1)]\}^{-1} - \rho S_{t-1}\quad (7)$$

(3) 車載器需要の膠着

普及率がある一定の値で膠着するとき、普及率の増分は0になる。例えば、式(7)の場合、膠着状況での普及率を S とすれば次式が成り立つ。

$$\{1 + \exp[-2\beta\bar{u} - \beta J(2S - 1)]\}^{-1} - S = 0\quad (8)$$

ここで \bar{u} は膠着状況における平均的個人の確定的な私的動機項である (\bar{u} は本来、時々刻々と変化するが、ここではとりあえず一定値とする)。また、 $2S - 1 \equiv m$ とおくと、式(8)は次のように再定式化される。

$$m = \tanh(\beta\bar{u} + 0.5\beta Jm)\quad (9)$$

これは、Brock and Durlauf⁴⁾ が示した社会的相互作用下での2項選択行動の均衡方程式と同一の形式であり、 \bar{u} と J の値次第で複数均衡解を持つ。

4. 車載器購入モデル・普及モデルの同定

(1) モデル同定上の課題

車載器購入モデルには、個人属性に加えて、普及率という、利用者間相互依存性を表す代理指標が含まれている。一方、車載器の高普及状態は未だ実現していないことから、高普及時の購入実績データは現存しない。よって本研究では、意識データ (SP データ) を用いて購入モデルの同定を行うことを検討する。

ここで、意識調査においても、普及の状況を車載器属性の1つとして導入する必要が生じる。しかし、回答者に車載器の普及率を直接提示しても、妥当な回答結果を得ることは難しいと想像される。そこで本研究では、車載器普及率と車載器パフォーマンスの関係に着目し、“ETC 利用によって料金所通過時に節約される待ち時間”と“車載器普及率”の関係を交通工学的な見地から定量的に把握することを前提に、“ETC 利用により料金所通過時に節約できる待ち時間”を回答者に提示している。

(2) 節約待ち時間と普及率との関係

節約待ち時間と車載器普及率との関係を特定化する。以下では算出過程の概要のみを示すが、詳細に関しては渡邊¹⁰⁾を参照されたい。

まず、普及率が S のときに ETC 利用によって料金所で節約できる待ち時間 $T(S)$ を以下のように定義する。

$$T(S) = t_n(0) - t_e(S)\quad (10)$$

ここで、 $t_n(0)$: 普及率0の場合の一般車料金所通過時間、 $t_e(S)$: 普及率 S の場合の ETC 車料金所通過時間である。さらに、 $t_e(S)$ を以下のように定義する。

$$t_e(S) = t_{Main}(S) + t_{e,Toll}\quad (11)$$

ここで、 $t_{Main}(S)$: 普及率 S の場合の本線渋滞通過時間、 $t_{e,Toll}$: ETC 車の料金所内通過時間である。

道路料金所の例として首都高速大井集約料金所(表-1)を取り上げ、その構造に基づいて通過時間と普及率

との関係を算出した。ETC 専用ゲートは、料金所に流入する ETC 車の日最大交通量が専用ゲートの総容量を越えないように追加整備されると仮定している(表-2)。

これらの条件のもとで、普及率と節約される待ち時間との関係を算出したのが表-3 である。ここでは、SP 実験で設定する節約待ち時間のレベルに対応する普及率のみを示している。但し、普及率が約 50%を超えると、節約待ち時間の増加率が極めて小さくなり、普及率と節約待ち時間の関係を一意に決めることが難しい。そこで、節約待ち時間が 8 分という状況に対しては、中程度の普及、高普及の 2 種類の状況が存在すると考え、普及率 55%と 85%という代表値を暫定的に設定し、意識調査における各 SP 回答をこれら 2 条件に無作為に割り振っている。

(3) 車載器購入手動モデルの同定

車載器購入モデルの同定には、一都五県在住の自動車

表-1 大井集約料金所の概要

料金所ゲート総数	7
一般ゲート流出容量(台/分)	7.5
ETCゲート流出容量(台/分)	13
本線1日平均渋滞長(m)	752.1
ETC車の料金所通過時間(分)	1.39
一般車の料金所通過時間(分)	7.86

*首都高速道路公園提供データに基づき作成

表-2 ETC 専用レーン数の設置基準

ETC 車専用レーン数	車載器普及率
1	0~22%
2	~44%
3	~66%
4	~88%
5	~100%

表-3 車載器普及率と節約待ち時間の対応関係

節約される待ち時間	車載器普及率
1分	0%
2分	1%
4分	10%
8分	55%
	85%

表-4 SP 実験で提示した車載器属性

属性	レベル
価格	25,000円
	30,000円
	35,000円
	40,000円
割引率	10%
	20%
	30%
	35%
節約される待ち時間	1分
	2分
	4分
	8分
対距離料金制	無し(現状)
	有り

利用者を対象としたインターネット・アンケートで得られた SP データを用いる。この調査では、表-4 に挙げた車載器に関する 4 つの属性を持つ 3 つの仮想代替案(車載器 1, 車載器 2, 購入しない)を提示し、そのうち 1 つを選択するように要求している。調査とデータの詳細は、Fukuda *et al.*¹¹⁾ を参照されたい。

節約される待ち時間は、表-3 の関係を用いて普及率に変換してモデルの同定に用いる。また、効用関数の確定項 $u_{i,t}$ を構成する変数として、表-4 に示した車載器属性や利用者の個人属性を用いる。この設定のもと、未知パラメータを推定した結果を表-5 に示す。車載器普及率のパラメータは有意な正の値となっており、利用者間相互依存性の影響が存在する可能性が伺える。

(4) 普及速度係数の同定

(3) で同定した購入モデルから推計される潜在的購入需要 D_t 、及び、道路システム高度化推進機構から提供された車載器のセットアップ台数実績値(2001.3~2002.11 の 21 ヶ月分の月別データ)を用いて普及速度係数 ρ を推定する。(3) で用いたサンプルの母集団が一都五県在住の自動車利用者であったため、車載器普及実績値と自動車保有台数に関しても、同様に一都五県の情報を用いる。 D_t の値としては、平均的個人を想定して得られる P_t の

表-5 個人の車載器購入モデルのパラメータ推定結果

	推定値	t 値
定数項	0.551	0.852
車載器普及率	3.17	19.3
車載器価格(万円)	-0.741	-3.44
高速道路利用料金割引率(%)	0.031	2.47
対距離料金制度の有無	0.887	3.92
高速道路利用頻度(回/週)	0.145	2.30
1回の高速道路利用距離(km)	1.00×10^{-3}	1.39
最大対数尤度	-353.44	
初期対数尤度	-1065.4	
自由度調整済み尤度比	0.665	
サンプル数	1537	

表-6 説明変数の設定値(平均的個人)

変数	設定値
車載器価格	4.5 万円(2001 年 3 月)から 3.0 万円(2002 年 11 月)まで一定率で低下させる
利用料金割引率	2001 年 3~12 月: 0% 2002 年 1 月~11 月: 20%
対距離料金制度	なし
高速道路利用頻度	0.64 回/週
高速道路利用距離	59.69km/回

表-7 普及モデルのパラメータ推定結果

	推定値	t 値
ρ	0.126	22.9
σ	1.83×10^{-4}	6.5
最大対数尤度	150.97	
データ数	21	

推計値を用いる。その際、現時点までの車載器価格や諸条件を反映させるために、表-6 に示した値を用いる。

以上の設定のもと、回帰分析によって普及速度係数 ρ を推定するため、式(5)を以下のように再定式化する。

$$\Delta \bar{S}_t = \rho(\hat{D}_t - \bar{S}_{t-1}) + v_t \quad (12)$$

ここで、 \bar{S}_{t-1} : $t-1$ 期の車載器普及率実績値、 $\Delta \bar{S}_t$: t 期の車載器普及率増分の実績値、 \hat{D}_t : t 期の車載器需要推計値である。また、 v_t は誤差項で $N(0, \sigma^2)$ に従うとする。

推定結果を表-6 に示す。 ρ の推定値は 0 から 1 の間に収まり、モデルの整合性も保持される結果となった。

5. 普及予測と政策介入の影響分析

(1) 普及促進のためのシナリオ

構築した普及予測モデルを用いて普及促進政策の影響分析を行う。ネットワーク外部性を有する財の場合、普及初期時点での導入コストを低廉化して需要規模を育成する方策が有効であり、ある臨界的な普及率を達成できさえすれば、その後は自動的に普及して行くと言われている¹²⁾。そのような性質に着目し、ここでは普及促進策の例として、図-1 に示す 3 つのシナリオ (Case 0 : 現状のまま, Case A : 価格漸減, Case B : 車載器価格の一時的な大幅値下げによる初期普及規模の育成) を想定し、それらの比較を行う。

(2) シミュレーション結果の考察

車載器普及率の推移をシナリオ毎にシミュレートし

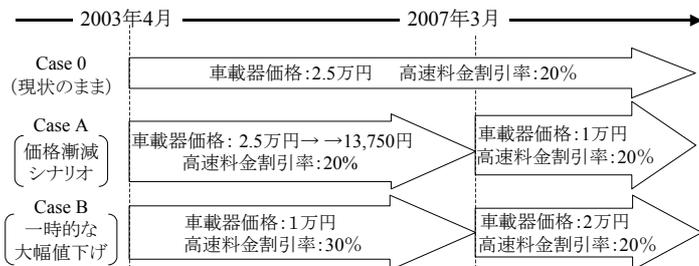


図-1 普及促進政策のシナリオ

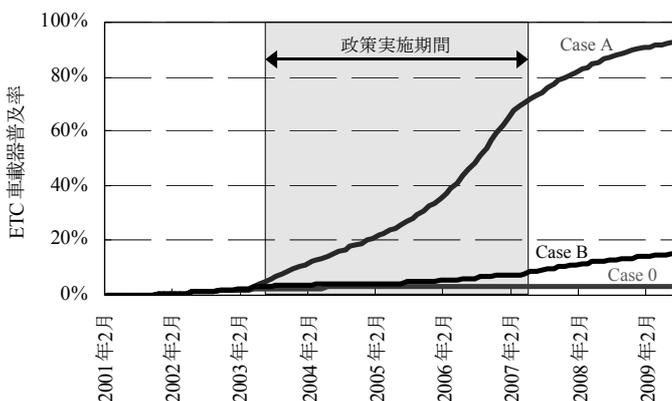


図-2 普及シミュレーションの結果

た結果を図-2 に示す。まず、現状のまま (Case 0) では、車載器普及率約 3% で膠着してしまう。すなわち、現状のままの車載器市場構造では、立ち上がり問題に直面してしまうと考えられる。また、価格漸減シナリオ (Case A) でも、車載器価格が徐々に低下するにもかかわらず、普及率 20% 弱で膠着する結果となった。すなわち、いずれの場合でも、低普及の状況でロック・インしてしまう。

一方、初期普及規模育成シナリオ (Case B) では、車載器価格が 2 万円になった後も、正の相互作用の影響により、より高いレベルの需要膠着状態に到達する結果となった。このように、たとえ一時的ではあっても、強力な普及促進政策 (例えば、政府が車載器を大量に買い上げて消費者に安価で提供したり、車載器製造業者に補助を行う等) により、初期時点である程度まで普及率を増加させることができれば、例えそれ以降に価格を元に戻しても、普及が自動的に進行する可能性が伺える。

6. おわりに

本研究では、ETC 車載器購入に関する利用者間の相互依存性を明示的に考慮した車載器普及モデルを構築し、普及促進政策の影響分析を行った。そして、一時的であっても強力な政策介入を行うことにより、車載器の普及を迅速化できる可能性があることを例示した。無論、① 事業系車両の購入行動の考慮、② 適切な意識データの取得、③ 未知パラメータの統計的推測方法の精緻化、④ シミュレーション結果の頑健性の検証、⑤ 車載器供給企業や公共主体側の行動の考慮、⑥ 普及率と節約待ち時間関係モデルの精緻化等、残された課題は多く、今後はそれらの改善を継続的にやりたい。

参考文献

- 1) Rohlfs, J.: A Theory of Interdependent Demand for a Communications Service, *Bell Journal of Economics and Management*, Vol. 5, pp. 16-37, 1974.
- 2) Rohlfs, J.: *Bandwagon Effects in High-Technology Industries*, MIT Press, Cambridge, 2001.
- 3) Metcalfe, J.: *Evolutionary Economics and Creative Destruction*, Routledge, London, 1998.
- 4) Brock, W. and Durlauf, S.: Discrete Choice with Social Interactions, *Review of Economic Studies*, Vol. 68, pp. 235-260, 2001.
- 5) 福田大輔, 上野博義, 森地茂: 社会的相互作用存在下での交通行動とミクロ計量分析, 土木学会論文集 (投稿中).
- 6) Matsuyama, K.: The Rise of Mass Consumption Societies, *Journal of Political Economy*, Vol. 110, pp. 1035-1053, 2002.
- 7) 清水哲夫, 屋井鉄雄: 自動料金収受システムの普及予測に関する基礎的研究, 第 19 回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 157-160, 1999.
- 8) 岡本直久, 石田東生, 佃晋太郎, 古屋秀樹: ETC 車載器の普及に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol. 26, CD-ROM, 2002.
- 9) Levinson, D. and Chang, E.: A Model for Optimizing Electronic Toll Collection Systems, *Transportation Research Part A*, Vol. 37, pp. 293-314, 2003.
- 10) 渡邊健: 利用者間の相互依存性を考慮した ETC 車載器普及予測モデル, 東京工業大学大学院情報理工学研究科修士論文, 2003.
- 11) Fukuda, D., Narumol, O. and Yai, T.: Use of Stated Choice Analysis to Determine ETC In-Vehicle Transmitter Purchasing Behavior, 土木学会論文集 (投稿中).
- 12) 依田高典: ネットワーク・エコノミクス, 日本評論社, 2001.