

利用者間の相互依存性を考慮した ETC 車載器普及モデル*

A Diffusion Model of ETC In-Vehicle Transmitters Incorporating the Interdependence among Road Users*

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) の本格的な運用が開始された。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などの直接的な効果が生じ得る。また、渋滞解消に伴う沿道大気環境の改善や、ロード・プライシングなど各種料金施策の実現による交通需要管理の効率化といった、間接的效果がもたらされることも期待されている^{1),2)}。

しかし、ETC 車載器 (以下、車載器) の普及台数に関して見れば、全国で280万台 (セットアップ台数、2004年4月末現在) を超えたものの³⁾、対自動車保有台数⁴⁾ 比で見ると約3.7%程度に留まっており、普及が迅速に進んでいるとは言いがたい。上記で述べた ETC 導入に伴う各種の効果が顕在化していないのが実状であり、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⁵⁾。

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関連社会基盤施設の整備水準が、当該時点での車載器の普及状況に適応していること (例えば、普及率が100%近いのに料金所の大半がマニュアル専用レーンであるといった状況を生じさせないことなど) が第一に必要である。すなわち、社会基盤の供給と車載器の普及と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想定すれば、車載器が普及するに従って料金所での平均的な待ち時間が削減され、道路利用者の車載器保有に対する効用が増大する。その結果、道路利用者の車載器購入行動が促進され、マクロ的な帰結として、車載器普及率も増加すると考えられる。

以上述べたように、社会基盤の供給と ETC 車載器の普及が協調して進行する場合には、システムの利用者が多いほど、車載器のパフォーマンスは大きくなり、それに伴って、個々の利用者が享受する便益が大きくなる。一方、社会基盤の供給が進まず、車載器の普及が低迷したままであれば、本線から料金所付近にかけての交通渋滞によって、ETC 利用者の料金所通過時間も削減されず、結果として購買行動も滞って車載器普及が進まないまま、低普及の状態で停滞する状況も起こり得る。このように、同じサービスを利用する個人の数が多く、そのサービスの利用から得られる効用が高まることから、ETC システムは、消費者間相互依存性の一つであるネットワーク外部性⁶⁾ の性質を有するサービスと解釈することができると考えられる。

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^{7),8)}。さらに、新規サービスの普及が低い状態で停滞する現象は、“立ち上がり問題 (Start-up Problem)” と呼ばれ⁸⁾⁻¹¹⁾、複数の安定した需要レベルのうち、低普及の状態で膠着してしまう場合と解釈することができる。交通政策の見地からは、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を検討すること、及び、立ち上がり問題に直面しているならば、どのようにしてその状況から脱却し普及を促進し得るのかを検討することの意義は大きいと思われる。

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々の道路利用者レベルのミクロな車載器購入行動モデルを構築する。さらに、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。

車載器普及過程のモデル化に関しては、これまで幾つかの研究¹²⁾⁻¹⁴⁾ が行われてきたものの、利用者レベルでのミクロな購入行動と、購入行動の集積として発現する車載器パフォーマンス特性との相互依存性を明示的に考慮した分析は、筆者らの知る限り見当たらない。その結果として、既往研究のモデルでは、車載器の普及が膠着する状況を表現できていない。

一方、ミクロ経済学の分野においては、消費者間相互依存性を明示的に考慮した行動モデルが古くから提

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

**正会員 博(工) 東京工業大学大学院理工学研究科
土木工学専攻(横浜市緑区長津田町 4259-G3-14
Tel & Fax: 045-924-5675)

***修(工) パシフィックコンサルタンツ株式会社
都市・地域本部(新宿区西新宿 2-7-1
Tel: 03-3344-1751 Fax: 03-3344-1549)

****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(横浜市緑区長津田町 4259-G3-14
Tel: 045-924-5615 Fax: 045-924-5675)

唱されており⁷⁾、近年では、“Interaction-based Model”と称して、主体間の相互依存性（社会的相互作用）を考慮した計量モデルの研究が進展しつつある¹⁵⁾。本研究におけるモデルの構築方針も、基本的に、このフレームに則している。

2. 車載器購入行動モデル

(1) モデル化の前提条件

個人の車載器購入行動モデルは、ミクロ計量経済学の分野において Brock and Durlauf^{15), 16)} が提案した、社会的相互作用を内生的に考慮した二項選択モデルを基本とする。福田他¹⁷⁾はこのモデルを社会的ジレンマ状況下での交通行動に対して適用している。本研究では、これらのモデルを、逐次的な意思決定行動を表現するように、さらに拡張する。

モデル構築に際しての前提条件を列記する。

- 有料道路利用者（以後、単に道路利用者として表記）を分析対象とする。
- 道路利用者は、車載器を購入するかどうかの検討段階に既に至っており、車載器を“購入する”、“購入しない”という二項選択を行うものとする。
- 離散時間での逐次的な購入意思決定状況を想定し、道路利用者は、各時点において、購入するかどうかの意思決定を行うものとする。
- 道路利用者の車載器購入行動に影響を及ぼす要因として、購入費用や自動車利用特性などに代表される“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（料金所での待ち時間削減量の程度）を表す“社会的要因”を想定する。
- ETC 対応料金所のような関連社会基盤の整備と車載器の普及とが協調的に進行するものと仮定し、社会的要因の影響は、ETC サービスのパフォーマンスの単調増加関数と考える。さらに、この社会的要因は、直前期の普及率の実績値によって規定されるものとする。

前提 (b) は、一度車載器を購入した利用後も、購入以後に車載器を利用しない可能性があることを意味する。Levinson and Chang¹⁴⁾は、これと同様の考えに基づいて ETC 利用による料金支払い形態の普及過程をモデル化しており、マクロな視点で見た場合、この前提を設けることは不自然ではないと考える。次に、前提 (c) は、マクロ普及モデルを同定するために必要な前提である。

また、前提 (d), (e) に関しては、このように、社会的要因の影響を想定することにより、利用者レベルで

のミクロな購入行動と、購入行動の集積として発現する車載器パフォーマンス特性との相互依存性を明示的に考慮することが可能となる。この相互依存関係については、4. (2) で具体的に説明する。なお、前提 (e) は、道路管理者が各時点での ETC 利用需要に見合った基盤整備を行うという想定であるが、普及台数に対応して ETC 搭載車専用レーンが漸次的に整備されている現状³⁾を鑑みると、非現実的な仮定ではないと考えている。

(2) 定式化

(1) で説明した前提条件に基づき、 t 期における道路利用者 i の車載器購入、非購入に対する間接効用を、それぞれ以下のように特定化する。

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

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

ここで、 $V_{ETC,i,t}$: 道路利用者 i が t 期に車載器を購入することによって得る効用、 $V_{NON,i,t}$: 道路利用者 i が t 期に車載器を購入しないことに対する効用、 $u_{i,t}$: 道路利用者 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、 J : ネットワーク外部性の影響度を表すパラメータである。 J が正であれば、周囲の道路利用者の車載器保有率が高いほど、当該道路利用者の車載器購入に対する効用が増大することを意味する。

次に、式 (1) から式 (2) を引くことにより、購入した場合と購入し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 $\varepsilon_{i,t} \equiv \varepsilon_{ETC,i,t} - \varepsilon_{NON,i,t}$ である。さらに、 $\varepsilon_{ETC,i,t}$, $\varepsilon_{NON,i,t}$ が、いずれも i, t に関して独立かつ同一のガンベル分布に従うと仮定する。 i に関して独立であることは、意思決定に関するコミュニケーションや取り決めを道路利用者間で行わないことを意味する。また、 t に関して独立であることは、当該道路利用者の現時点の購入意思決定が、他時点の意思決定の影響を受けないことを意味する。以上より、道路利用者 i の t 期における車載器購入確率 $P_{i,t}$ は、以下の二項ロジットモデルで表される。

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

ここで、 β はスケールパラメータである。

3. 車載器普及モデル

(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へと展開する。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割することができる。また、 t 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に等しい。

次に、 t 期期首に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、この需要の市場全体に対するシェアを D_t で表す。但し、 D_t はあくまでも、 t 期期首における“潜在需要”であり、 t 期終了時点でその潜在需要が全て顕在化して、普及率増分の実現値である $\Delta S_t (\equiv S_t - S_{t-1})$ に一致するとは必ずしも限らない (図-1)。

(2) 普及メカニズム

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規定する。ここでは Matsuyama¹⁸⁾ 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普及構造を考える。具体的には、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、 $\rho (0 < \rho < 1)$ 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することができ、“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^{7,9)}では、車載器を耐久消費財（一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、車載器の普及が低い状態で膠着する可能性を記述するために、車載器を一度購入した消費者も再度購入行動を行うと考える (図-1)。これにより、道路利用者が ETC の利用を中止することも表現することができるが、これは、2. (1) の前提 (a) にも対応している。式で表すと以下ようになる。

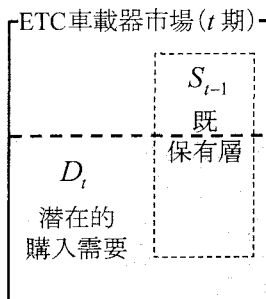


図-1 車載器市場の構成

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

すなわち、 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集団としての購入比率 P_t に等しくなる。

このとき、例えば、平均値法¹¹⁾によって P_t を与えると、式 (5) は以下のように再定式化される。

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

ここで、 $\bar{u}_t$ は時点 t における u_{it} の集団平均値である。

(3) 車載器普及の膠着

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 のまま時間的に変化しない。そこで、式 (7) において、膠着状況（定常状態）時の普及率を $\tilde{S}$ とすれば、次式が成り立つ。

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

ここで、 $\bar{u}$ は膠着状況時における平均的個人の確定的な私的効用項である（ $\bar{u}$ 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）。さらに、 $2\tilde{S} - 1 \equiv m$ とおくと、双曲線正接関数の定義より、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 Durlauf^{15),16)} が示した社会的相互作用存在下の二項選択行動の均衡方程式と同一の形式であり、 $\bar{u}$ と J の値次第で複数の均衡解を持つことが知られている。

4. モデルの同定

(1) 購入行動・意識に関するマイクロデータ

車載器購入モデルには、私的要因に含まれる個人属性のみならず、普及率という、利用者間相互依存性を表す社会的要因が含まれている。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。また、既保有者を特定化して、実際の購入時の情報を入手することも極めて難しい。そこで、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。

この場合、意識調査において、普及の程度（普及率）を車載器属性の一つとして導入する必要がある。しかし、回答者に車載器の普及率を直接提示しても、状況に合致した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の関係

以下では、既往研究¹⁹⁾を参考にして、節約待ち時間と車載器普及率との関係を特定化する。算出過程の詳細に関しては、付録及び渡邊²⁰⁾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 $T(S)$ を次式のように定義する。

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

ここで、 $t_n(0)$ ：普及率 0 の場合の一般車料金所通過総所要時間、 $t_e(S)$ ：普及率 S の場合の ETC 搭載車料金所通過総所要時間であり、節約待ち時間 $T(S)$ は、それらの差として定義されることになる。これに対して、普及率が同一の状況で、一般車と ETC 搭載車それぞれの料金所通過時間を求め、それらの差として節約待ち時間を定義する考え方もあるが、本研究では、口述する SP 実験との整合性を考慮して、そのような定義を行っている。

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 の場合の本線リンク通過時間、 $t_{e,Toll}$ ：ETC 搭載車の料金所リンク通過時間である。これらの変数は、対象とする料金所の構造特性及び交通流特性によって規定される。その具体的な算出手順は付録に記す。

本研究では、首都高速道路における典型的な料金所という理由で大井集約料金所(表-1)を採り上げ、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。なお、ETC 専用ゲートに関しては、2. (1) の前提 (d) に対応して、料金所に流入する ETC 搭載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ように設定する(表-2)。

これらの条件のもと、普及率と節約される待ち時間との関係を算出した結果が表-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。なお、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結果となった。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、高程度の普及という 2

表-1 大井集約料金所の概要^[2]

料金所ゲート総数	7
一般ゲート容量(台/分)	7.5
ETCゲート容量(台/分)	13.3
ジャム密度(台/km)	120
ETC車の料金所リンク平均通過速度(km/h)	30
日平均本線渋滞長(m)	752.1
料金所リンク長(m)	100.0
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

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%

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た。意識調査における SP 回答においては、これらの普及率に無作為配分することで対応付けを行っている。なお、これらの普及率の値は、節約待ち時間が 8 分の場合に算出される普及率の中間値と最大値に相当する。

(3) 意識調査の概要

車載器購入モデルの同定には、2002 年 6 月 14 日～6 月 21 日にかけて実施されたインターネット調査で得られた SP データを用いる。調査は、株式会社情報開発センター (<http://www.idcnet.co.jp/>) に依頼して行った。対象母集団は、この会社が実施する各種マーケティング調査の登録モニター全 19653 名(2002 年 5 月 30 日現在)のうち、①関東圏(東京都、神奈川県、埼玉県、千葉県、群馬県、栃木県、茨城県)在住であること；②自家用車を少なくとも 1 台は保有していること；という両条件を満たす個人である。調査は、上記条件を満たす個人を予め選別した上で、①E-mail による調査依頼を行い；②一定期間内に調査用 WEB へアクセスして各質問に回答してもらう；という手順で実施した。調査用 WEB は、ASP 言語を用いて筆者らが作成し、東京工業大学内の WWW サーバに設置した。

調査項目とサンプル特性の詳細に関しては, Narumol *et al.*²¹⁾、及び、屋井・福田²²⁾を参照されたい。

この意識調査では、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。上記の3つの代替案のうち、車載器1もしくは車載器2を選択した場合には、回答者がETC車載器の購入行動を行ったと見なしている。

車載器属性と選択肢集合の設定は次の通りである。まず、 $4^3 \times 2$ の一部要因配置計画により、各属性の主効果だけが識別される全14種類のプロファイル(車載器1)を作成する。次に、これらの車載器の各属性レベルを反転^[3]させることによって、新たに車載器プロファイルを作成する。これを車載器2とする。最後に、“購入しない”という代替案を加えて、合計14個の選択肢集合が形成される²³⁾。実際の調査においては、回答負荷を軽減するため、上記14パターンからランダムに少数個を取り出し、それらのSP質問に対する回答を個々のサンプルに要求している。

購入行動モデルの同定には、得られた全579の個人サンプルのうち、有効SP回答1537サンプルを用いる。すなわち、同一の個人が異なるSP実験に回答している場合も別個人と見なしている。

(4) 説明変数の設定と車載器購入行動モデルの同定

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_{it} を構成する変数として、表-4に示した車載器属性及びその他の利用者個人属性を用いる。

以上の設定のもと、未知パラメータを最尤推定法によって求めた結果を表-5に示す。推定に先立ち、スケールパラメータ β は1に基準化してある。また、 u_{it} を線形関数(定数項を含む)により特定化している。なお、節約される待ち時間に関しては、車載器普及率との多重共線が生じるため、モデルから除外してある。

表-5より、車載器価格が低く、利用料金割引率が大きいくほど、車載器を購入する確率が高いことが伺える。また、対距離料金制度が導入された場合の方がそうでない場合よりも車載器を購入する傾向が高いことも示されている。道路利用特性に関しては、高速道路利用頻度が多いほど、1回当たりの利用距離が大きいくほど、車載器購入確率が大きくなる結果となり、これらも、直感に合致した結果となっている。

また、車載器普及率のパラメータは有意な正の値となり、かつ、その絶対値が1よりも大きくなっている。これより、強い利用者間相互依存性が存在する可能性が示唆される。

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

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(%)	0.0306	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	
尤度比	0.668	
自由度調整済み尤度比	0.665	
サンプル数	1537	

(5) 普及速度係数の同定

(4)で同定した購入モデルから推計される潜在的購入需要 $\hat{D}_t$ 及び、普及率の実績値 $\bar{S}_{t-1}$ を用いて普及速度係数 ρ を推定する。 $\hat{D}_t$ の値としては、平均的個人を想定して得られる購入比率の推計値 $\hat{P}_t$ 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に示した値を用いて平均的個人を定義する。 $\bar{S}_{t-1}$ は、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年3月～2002年11月の計21ヶ月分の月別データ)、及び、自動車検査登録協会から得られた乗用車保有台数を用いて算出する。(3)で収集したサンプル母集団が一都五県在住の自動車利用者であるため、これらの実績値に関しては、一都五県の統計情報を用いている。

以上の設定のもと、Tobit回帰を用いて普及速度係数 ρ を推定するため、式(5)を次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、 $\Delta \bar{S}_t$: t 期の車載器普及率増分の実績値($\equiv \bar{S}_t - \bar{S}_{t-1}$)、 $\hat{D}_t$: t 期の車載器需要推計値である。また、

表-6 平均的個人の説明変数の設定値

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)まで一定比率で低下させる
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}	6.48
最大対数尤度	151.0	
決定係数	0.811	
データ数	21	

v_i は誤差項で、正規分布 $N(0, \sigma^2)$ に従うと仮定する。

マクロ普及モデルの推定結果を表-7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

本節では、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、その後は内的なダイナミクスによって自動的に普及して行くと言われて⁹⁾いる。このような性質に着目し、以下では普及促進策の例として、図-2に示す4つのシナリオ (Case 0: 現状のまま, Case A: 価格漸減, Case B・C: 一時的に車載器価格の値下げ及び高速道路料金割引率の増加を行うこと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と考察

車載器普及率の推移をシナリオ毎にシミュレートした結果を図-3に示す。まず、現状のまま (Case 0) では、低い普及率で膠着してしまうことが伺える。式 (8) に基づいて膠着時の普及率を推計すると、約3%となる。すなわち、現状のままでは、立ち上がり問題に直面してしまう可能性が高いことが示唆される。次に、価格漸減シナリオ (Case A) の場合でも、車載器価格が徐々に低下する設定となっているにもかかわらず、普及率20%弱の状況で膠着する結果となっている。同じく、高速道路料金割引率を固定したまま車載器価格のみを一時的に大幅に低下させる初期普及規模育成シナリオ① (Case B) の場合でも、Case Aと同程度の普及率の状態で膠着する結果となっている。すなわち、Case 0, Case A, Case Bいずれの場合でも、低普及の状態でロック・インしてしまうことになる。

一方、高速道路料金割引率と車載器価格を同時に変化させる初期普及規模育成シナリオ② (Case C) では、値下げ期間が終了して、車載器価格が2万円に、高速道路料金割引率が20%に戻った後でも、強い正の相互

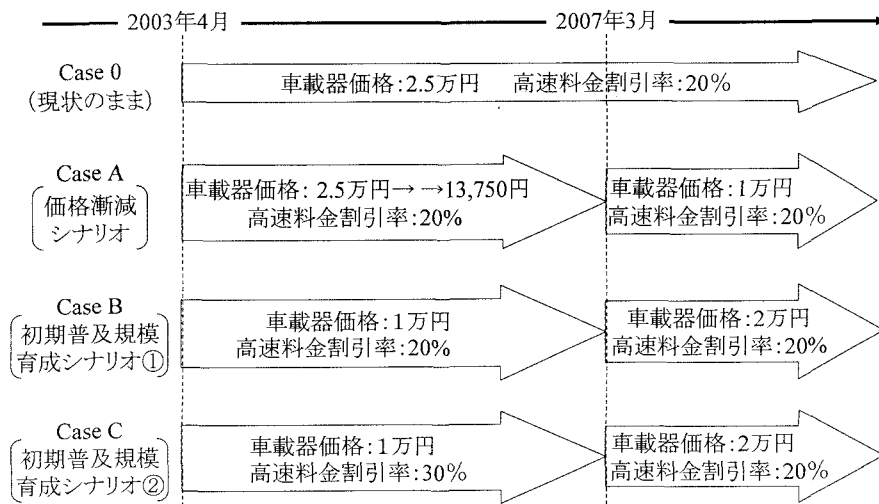


図-2 普及促進のための各政策シナリオ

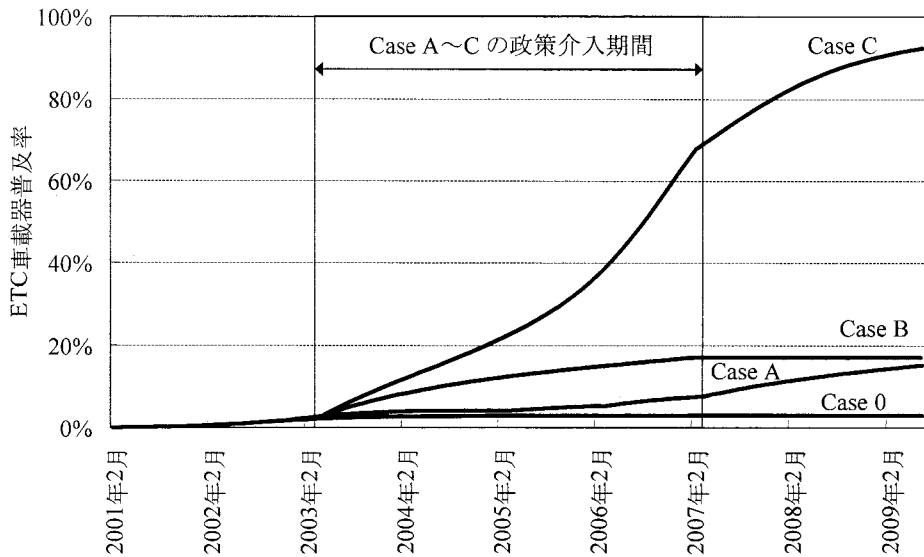


図-3 普及シミュレーションの結果

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ている。このように、一時的ではあっても、強力な普及促進政策を施すにより、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高額の設定に戻したとしても、普及が自動的に進行する可能性が示唆される。そのための具体的な政策としては、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金を提供したりすることを通じて、実質車載器価格を一時的に大幅低下させることなどが考えられる。

6. おわりに

本研究では、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、例え一時的であっても強力な政策介入を行うことにより、車載器の普及を促進できる可能性があることを例示した。

但し、本研究で示したシミュレーション結果は、あくまでも、上記のような状況が起こりうることの一例に過ぎず、また、その信頼性評価も十分に行われていない。引き続き、多様なケースのもとでシミュレーションを実行し、政策の比較を行いたい。また、信頼性を向上するためには、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車載器供給企業や公共主体側の行動の考慮、⑤普及率と節約待ち時間関係モデルの精緻化などといった、残された課題の改善を継続的に行う必要がある。特に、③のモデルの同定に関しては、

中山²⁴⁾も指摘するように、本研究で提示したタイプのモデルでは、カオス的な分岐現象が生じる可能性がある。そのような場合、シミュレーション結果の頑健性が極めて脆弱なものとなってしまう。これを改善するためにも、例えば、複数均衡の存在を考慮した統計的推測²⁵⁾を確立することが必要である。今後は、上記のような課題の改善を継続的に行いたい。

謝辞

貴重な修正意見を頂いた匿名の査読員の方に、この場をお借りして感謝の意を表します。

補注

- [1] 平均値法以外にも、例えば、個人属性の分布を与えることによって集計購入比率を規定することが可能である。例えば、福田他¹⁷⁾では、近似的な経験分布を用いて、ミクロマクロ関係を表す均衡方程式を規定している。一方、本研究の場合、普及シミュレーションを行う場合に計算が容易という理由から、平均値法を採用している。
- [2] 首都高速道路公団から提供頂いたデータに基づいて作成している。
- [3] 例えば、属性のレベルが1, 2, 3, 4という4段階の場合、レベル1の反転によりレベル4が得られ、レベル2の反転によりレベル3の属性が得られることになる。

参考文献

- 1) 道路システム高度化推進機構: ETC 便覧, 2002.
- 2) 自動車走行電子技術協会: ITS 産業動向に関する調査研究報告書—ITS 産業の最前線と市場予測 2002—, 2002.
- 3) 道路システム高度化推進機構ホームページ:

(<http://www.orse.or.jp/>)

- 4) 自動車検査登録協会ホームページ:
(<http://www.aira.or.jp/>)
- 5) 国道交通省道路局道路審議会有料道路部会: ETC 普及促進策について(案),
(<http://www.mlit.go.jp/road/singi/etcenv/2-2.html>)
- 6) 依田高典: ネットワーク・エコノミクス, 日本評論社, 2001.
- 7) Leibenstein, H.: Bandwagon, Snob, and Veblen Effects in the Theory of Consumers' Demand, *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 64, pp. 183-207, 1950.
- 8) Rohlfs, J.: A Theory of Interdependent Demand for a Communications Service, *Bell Journal of Economics and Management*, Vol. 5, pp. 16-37, 1974.
- 9) Rohlfs, J.: *Bandwagon Effects in High-Technology Industries*, MIT Press, Cambridge, 2001.
- 10) Metcalfe, J.: *Evolutionary Economics and Creative Destruction*, Routledge, London, 1998.
- 11) 宮尾尊弘: 情報革命と S 字波一構造モデルとカタストロフィー, *Glocom Review*, Vol. 6, No. 10, pp. 1-15, 2001.
- 12) 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.
- 13) 岡本直久, 石田東生, 佃晋太郎, 古屋秀樹: 車載器購入行動分析に基づく ETC 普及メカニズムに関する考察, 土木計画学研究・論文集, No. 20, pp. 871-877, 2003.
- 14) Levinson, D. and Chang, E.: A Model for Optimizing Electronic Toll Collection Systems, *Transportation Research A*, Vol. 37, pp. 293-314, 2003.
- 15) Brock, W., Durlauf, S.: Interactions-Based Models, In: Heckman, J., Lerner, E. (Eds.), *Handbook of Econometrics: Vol. 5*, Elsevier Science, Amsterdam, pp. 3297-3380, 2001.
- 16) Brock, W. and Durlauf, S.: Discrete Choice with Social Interactions, *Review of Economic Studies*, Vol. 68, pp. 235-260, 2001.
- 17) 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, No.765 / IV-64, pp. 49-64, 2004.
- 18) Matsuyama, K.: The Rise of Mass Consumption Societies, *Journal of Political Economy*, Vol. 110, pp. 1035-1053, 2002.
- 19) 堀口良太, 桑原雅夫: ETC 導入による料金所容量への影響に関する理論的解法と考察, 土木学会論文集, No. 653 / IV-48, pp. 29-38, 2000.
- 20) 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情報環境学専攻修士論文, 2003.
- 21) Narumol, O., Fukuda, D. and Yai, T.: Conjoint Analysis for Individuals' Purchasing Behavior of ETC In-Vehicle Transmitters, 東京工業大学土木工学科研究報告, No. 66, pp. 41-54, 2002.
- 22) 屋井鉄雄, 福田大輔: 首都高速道路の料金体系に関する調査研究報告書(その 4), (財)首都高速道路協会, 2002.
- 23) Louviere, J., Hensher, D. and Swait, J.: *Stated Choice Methods: Analysis and Application*, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- 24) 中山晶一郎: ロジット型離散選択に基づいた流行現象モデル, 理論と方法, Vol. 18, pp. 89-102, 2003.
- 25) 例えば, Tamer, E.: Incomplete Simultaneous Discrete Response Model with Multiple Equilibria, *Review of Economic Studies*, Vol. 70, pp. 147-165, 2003.

付録 節約待ち時間と普及率の関係の把握方法

a) 変数一覧と想定する料金所の構造

算出に必要な変数を以下のように定義する。また、料金所の構造を図-4 のように仮定する。料金所ゲートの手前に拡幅部分があり、この部分を料金所リンク、料金所リンクに接続する本線を本線リンクと称する。

L : 料金所リンク長

N : 料金所ゲート総数

m : ETC 専用ゲート数

S : ETC 搭載車普及率 (ETC 利用率)

$q_{n,out}$: 一般車専用ゲート 1 レーンあたりの容量

$q_{e,out}$: ETC 専用ゲート 1 レーンあたりの容量

Q : 本線上の総交通量

Q_e : 本線上の ETC 搭載車交通量

d_{Max} : 料金所 1 レーンあたりの最大待ち行列台数
($= k_j \cdot L$)

$D(S)$: 普及率 S の場合における本線平均渋滞台数

τ : 本線平均渋滞台数 $D(S)$ を算出する際の観測時間

k_j : ジャム密度

$\bar{v}_e$: ETC 専用ゲートリンク内での平均通過速度

$t_{n,Toll}$: 料金所リンク飽和時の一般車平均通過時間

$t_{Main}(S)$: 普及率 S での本線平均通過時間

$t_n(S)$: 普及率 S での一般車料金所通過総所要時間

b) $t_n(0)$ の算出

$t_n(0)$ は、次式によって定義される。

$$t_n(0) = t_{Main}(0) + t_{n,Toll} \quad (13)$$

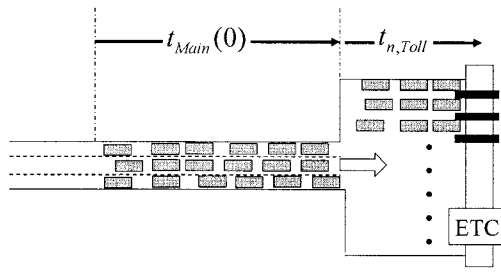
料金所リンク内が飽和するだけの渋滞待ち行列が存在していると想定すれば、 $t_{n,Toll}$ は、1 レーンあたりの平均待ち行列台数と料金所の容量から、以下のよう求めることができる。

$$t_{n,Toll} = \frac{d_{Max}}{q_{n,out}} = \frac{k_j L}{q_{n,out}} \quad (14)$$

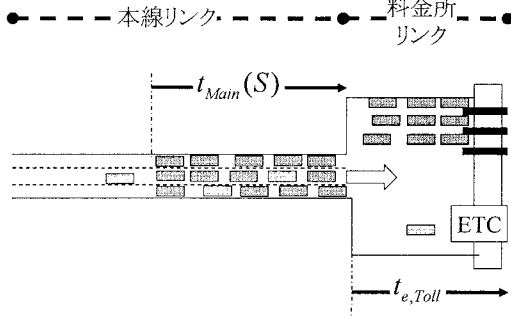
また、本線リンクからの流出交通量は、料金所ゲートにおける合計の流出交通量に等しい ($N \cdot q_{n,out}$) ことに着目すると、本線リンクに渋滞台数が $D(0)$ 台生じている状況において、この渋滞の最後尾に到着した車両の料金所リンクに到達するまでの時間 $t_{Main}(0)$ は、次式で与えられる。

$$t_{Main}(0) = \frac{D(0)}{(N - m)q_{n,out}} \quad (15)$$

式 (14), (15) より、 $t_n(0)$ が求まる。



(a) 普及率 0 の場合



(b) 普及率 S の場合

□ : ETC 搭載車 ■ : 一般車

図-4 想定する料金所の構造

c) $t_{Main}(S)$ の算出

一般車ゲートに、その総容量を越える交通量の一般車が流入し、待ち行列が本線リンクまで延伸している状況を想定する。この場合、本線リンクに流入した全車両（ETC 車も含む）が、渋滞に巻き込まれることになる。このとき、本線から料金所リンクに流入する ETC 車の単位時間あたり台数は次式で表される。

$$Q_e = \frac{S}{1-S} \cdot q_{n,out} (N-m) \quad (16)$$

すると、本線リンクから料金所リンク内の一般ゲートと ETC 専用ゲートへの合計の流入交通量は、次式で表される。

$$Q = \frac{Q_e}{S} = \frac{q_{n,out} (N-m)}{1-S} \quad (17)$$

ここで、料金所 1 レーンあたりの最大待ち行列台数 d_{Max} が、本線リンクに生ずる渋滞台数に比べ十分に小さいとすれば、普及率 S のときに本線リンクに生じている渋滞台数 $D(S)$ は、普及率 0 のときの本線リンク渋滞台数 $D(0)$ を用いて次式で表される。

$$D(S) = D(0) - \tau(Q - N \cdot q_{n,out}) \quad (18)$$

すると、渋滞最後尾に到着した車両が本線リンクを通過に要する平均時間 $t_{Main}(S)$ は、一般車、ETC 車に関わり無く、次式で表される。

$$t_{Main}(S) = D(S)/Q \quad (19)$$

d) $t_{e,Toll}$ の算出

2. (1) の前提 (d) に即して、道路管理者の ETC ゲート増設ルールを以下のように想定する。

ETC 専用ゲート流出交通量 $q_{e,out}$ と ETC 専用レーン数 m によって求まる ETC ゲート総容量 ($m \cdot q_{e,out}$) が、ETC 車交通量 Q_e を下回らないようにゲート数を 1 ずつ増加させる。

このルールに従って ETC 専用ゲートが整備されるとすれば、料金所リンクに流入した ETC 車は、レーン内で渋滞を生じることなく料金所を通過できる。そのときの料金所リンク内での平均通過速度を $\bar{v}_e$ とすれば、ETC 車の料金所リンク通過時間 $t_{e,Toll}$ は次式で与えられる。

$$t_{e,Toll} = L/\bar{v}_e \quad (20)$$

具体的には、表-2 に示した数値設定に従って、レーンが増設されることになる。

e) $T(S)$ の算出

以上、a)～e) の手順を経て、式 (10) によって任意の普及率に対する節約待ち時間を算出することが可能となる。具体的には、表-1 に示した各パラメータ値の設定のもと、ETC 普及率 S を変化させて、対応する節約待ち時間 $T(S)$ を算出する。

ETC システムは、個々の道路利用者のミクロな車載器購入行動とマクロな普及率との間に相互依存関係が存在する、すなわち、普及の程度に応じて各利用者の享受する効用が変化するという特徴を有していると考えられる。本研究では、車載器のマクロな普及状況と、個々の道路利用者の車載器購入意思決定との相互依存関係を考慮した車載器普及モデルを構築する。提案したモデルによって、動的な普及の過程のみならず、車載器が低普及の状態に膠着する状態を記述ことが可能となる。最後に、SP 実験で得られた車載器購入意識データを用いてモデルの同定を行い、各種の政策による普及パターン変化をシミュレートしている。

A Diffusion Model of ETC In-Vehicle Transmitters Incorporating the Interdependence among Drivers

By Daisuke FUKUDA, Takeshi WATANABE and Tetsuo YAI

It is considered that ETC (Electronic Toll Collection) systems include noticeably interdependent relations among individuals' purchasing behavior of in-vehicle transmitter and its diffusion rate. This study aims to develop a diffusion-forecasting model of ETC in-vehicle transmitters by considering the interdependence among individuals' purchasing behavior and an aggregate market share. The model represents the dead-locked states of diffusion as well as the dynamic process of diffusion. The behavioral model is econometrically specified by using the data from stated choice experiments of transmitter purchasing decisions. Finally, the diffusion processes of transmitters are simulated in order to evaluate the effects of implementing various promotion policies of ETC in-vehicle transmitters.
