

歩車協調安全システム普及に向けての政策

応用地域学会 第21回研究発表大会

三好博昭

同志社大学 技術・企業・国際競争力研究センター (ITEC)

専任フェロー

602-8580 京都市上京区今出川通烏丸東入

Tel: 075-251-3837/ Fax: 075-251-3139

E-mail: hmiyoshi@mail.doshisha.ac.jp

谷下雅義

中央大学理工学部土木工学科准教授

東京都文京区春日 1-13-27

1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan 112-8551

Tel: 03-3817-1810/ Fax: 03-3817-1803

E-mail: tanishi@civil.chuo-u.ac.jp

キーワード：歩車協調安全システム（Cooperative Vehicle-Pedestrian Safety System）、ITS（Intelligent Transport Systems）、人対車両事故（Pedestrian-Vehicle Accidents）、クリティカル・マス（Critical Mass）、インディカティブ・プランニング（Indicative Planning）、動学的安定性（Dynamic Stability）

著者の専門領域：

三好博昭：公共経済学（Public Economics）、交通経済学（Transport Economics）

谷下雅義：土木計画（Infrastructure Planning）、交通経済学（Transport Economics）

要旨：

歩車協調安全システムは、歩行者と自動車を通信で結び、死角に入った歩行者の存在をドライバーに警告するシステムである。本稿は、この歩車協調安全システムの普及のために必要な政府の政策を理論的に考察することを目的としたものである。本稿の主な結論は次の通り。歩行者端末と車載器のクリティカル・マスが存在するのであれば、政府はクリティカル・マスを僅かに超える歩行者端末（または車載器）を無償配布することによって、歩車協調安全システムの望ましい普及水準を達成することができる。また、インディカティブ・プランを導入し、車載器（または歩行者端末）の目標普及率を人々にアナウンスすることによって、クリティカル・マスを小さくし、無償配布に必要な財政コストを縮減できる。

謝辞：

本稿は、同志社大学の文部科学省 21 世紀 COE プログラム「技術・企業・国際競争力の総合研究」における研究プロジェクト「自動車の技術革新と政府の政策」の研究成果である。本稿執筆にあたっては、トヨタ自動車(株)IT・ITS 企画部佐藤則明氏、(株)トヨタ IT 開発センター杉崎曜子氏より有益なコメントを得た。この場をかりて、厚く感謝の意を表する次第である。

歩車協調安全システム普及に向けての政策

三好博昭/ 谷下雅義

I はじめに

歩車協調安全システムは、安全分野の ITS(Intelligent Transport Systems)の 1 つのアプリケーションであり、歩行者と自動車を通信で結び、死角に入った歩行者の存在をドライバーに警告することによって、人体車両事故を未然に防ごうとするものである。

ITSについては、既に、ATIS(Advanced Traveler Information Systems)やETC (Electronic Toll Collection) といった主に渋滞解消を目的としたシステムが 1990 年代後半から実用化されており、その効果や市場普及政策についても多くの研究が行われてきた。ATISについては、1990 年代に、交通情報の旅行時間短縮効果について精力的に研究が行われた (Ben-Akiva et al., 1991; Emmerink et al., 1995; Koutsopoulos and Lotan, 1990; Lo et al., 1995; Mahmassani and Jayakrishnan, 1991; Yang, 1999 等)¹。さらに、最近では、いくつかの市場普及モデルも構築されており (Emmerink et al., 1996, 1998; Yang, 1998, 1999; Yang and Meng, 2001; Yin and Yang, 2003; Zang and Verhoef, 2005 等)、このうち政策的観点からは、Emmerink et al.(1996)、Zang and Verhoef (2005)が、交通情報サービスに対する税/補助金政策の効果を分析している。ETCについては、Levinson and Chang (2003)と福田等 (2004)が、ETCのネットワーク外部性を明示的に考慮したモデルを構築し、経済厚生観点から、料金割引など政府の普及促進政策の効果を分析している。

これに対し、歩車協調安全システムは、現在開発段階中にあるシステムであり、普及のための政策研究も未だ行われていない。しかし、このシステムの普及に向けた政策を議論することは、次の 2 つの観点から重要である。その第 1 は、人対車両事故の深刻さである。日本では、2005 年の総事故件数約 93 万件の内、人対車両事故はその 1 割弱の約 8 万件である。しかし、死亡事故でみれば、総死亡事故件数 6,625 の内、人対車両事故はその 3 割を超える 2,007 件となっている²。死亡事故の抜本的な削減のためには、人対車両事故を削減することが急務となっているのである³。第 2 は、歩車協調安全システムの財としての性質に起因する。一般にインターネット、携帯電話、コンピュータソフト、CD、DVD、TVゲーム等、IT産業で扱われる財・サービスは、「ネットワーク外部性」⁴、即

ち、消費者の便益は、同一の財・サービスを消費する消費者が増加すればするほど増加する、という共通した性質を持つ。それ故、当該財・サービスの普及率に対する人々の期待が実際の市場普及率に大きな影響を与えることになる。これに対し、歩車協調安全システムでは、歩行者とドライバーの双方が、このシステムの為の特別の装置を所持しなければならない。そして、歩行者が歩行者用の装置（以下、歩行者端末）を所持することによって得られる便益は、車側の装置（以下、車載器）の普及率に依存する。反対に、ドライバーが車載器を所持することによって得られる便益は、歩行者端末の普及率に依存する。この相互依存関係のため、相手側の装置の普及率に対する期待が、当該装置の実際の市場普及率に大きな影響を与えることになるのである。歩車協調安全システムを適切に普及させるためには、このユニークな性質に配慮した独自の政策が有効となる。

本稿は、この歩車協調安全システムの普及に必要な政府の政策を理論的に考察することを目的としたものである。以下、本稿の構成、内容、主なfindingsについて記述する。まず、IIで歩車協調安全システムの概要を解説したあと、IIIで、ネットワーク外部性を扱ったRohlf's(1974)、林(1992)のモデルをより一般化したモデルを用いて、歩車協調安全システムの市場均衡普及率とその動学的性質について理論的な分析を行う。そして、IVでは、具体的な関数を設定して、市場均衡普及率とその動学的性質を図解する。最後に、Vで、歩車協調安全システムを普及させるための政府の政策を議論する。本稿の主な結論は次の通りである。歩行者端末と車載器のクリティカル・マスが存在するのであれば、政府はクリティカル・マスを僅かに超える歩行者端末（または車載器）を無償配布することによって、歩車協調安全システムの望ましい普及水準を達成することができる。また、インディカティブ・プランを導入し、車載器（または歩行者端末）の目標普及率を人々にアナウンスすることによって、クリティカル・マスを小さくし、無償配布に必要な財政コストを縮減できる。

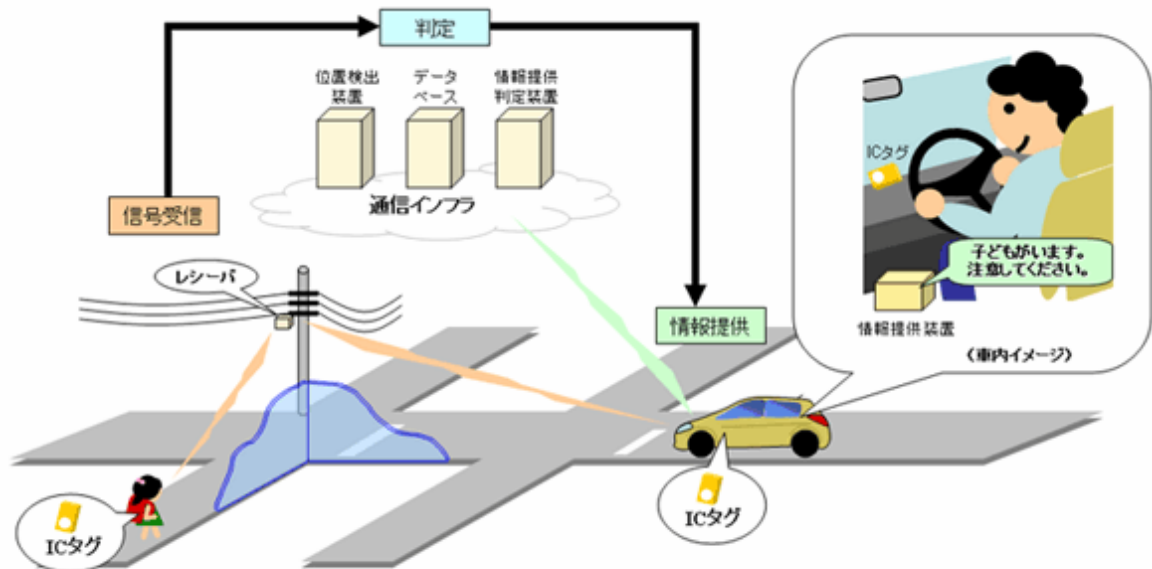
II 歩車協調安全システムの概要

人体車両事故は、歩車協調安全システムのみならず、主に車両相互事故の回避を目的とした路側情報利用型運転支援システムや情報交換型運転支援システムにおいても、対応すべき重要な事故類型の1つと考えられている。路側情報利用型運転支援システムでは、路上に設置された感知器で歩行者をキャッチし、光ビーコンを通じて車内のVICS端末（3メディア対応型）に警報を表示する。情報交換型運転支援システムでは、他の車のセンサーがキャッチした歩行者情報が、事故を起こす危険性のある車に配信される。こうした方式によって、左折車両と横断歩道の歩行者との事故等が回避可能となるのである。両システム共、実用化はこれからだが、人体車両事故の回避という点では、双方とも、交通量の多い大きな交差点等に適したシステムであり、小さな交差点や住宅地にはあまり適していない。何故なら、こうしたエリアのすべてに歩行者感知器と光ビーコンを設置するには莫大な費用がかかるからである。また、こうしたエリアは、交通量が少ないために、他車の情報に依存する情報交換型運転支援システムでは、必要な情報が得られないからである。

これに対し、歩車協調安全システムは、主に小さな交差点や住宅地における人体車両事故を防ぐことを目的としたシステムである。現在、通信デバイスとしてICタグを利用するものや携帯電話を利用するもの等が考えられている。図1は、(株)NTTデータ、日産自動車(株)、イツ・コミュニケーションズ(株)、(株)トレンディ、東急セキュリティ(株)の5社が2005年12月～2006年3月末に横浜市青葉区みたけ台地区において実証実験を行ったICタグを利用した歩車協調安全システムである。このシステムは、子供の安全を守ることを目的にしたものであり、車が住宅街を走行する際に、ICタグを持つ児童等が近くに存在すると、音声でドライバーに「近くに子どもがいます。注意してください」と注意を促す。これによってドライバーは、死角に入った児童の存在を知ることができる。このシステムでは、児童とドライバーの双方がICタグを所持する必要がある、加えて、車側には専用の情報提供装置を搭載する必要がある。児童とドライバー双方のICタグより発せられた信号は交差点等に設置されたレシーバがキャッチし、センター側で危険性を判断した上で、ドライバーに警告が発せられる。なお、このシステムは、歩行者に対する警告機能は持っていない⁵。

「子ども存在情報 ドライバー通知サービス」

近くに子どもがいるという情報をドライバーに提供し、安全運転を支援します。



資料) NISSAN PRESS RELEASE、2005年11月16日

図 1 歩車協調安全システムの実証実験例

歩車協調安全システムとしては、この方式の他、新しい機能を搭載した携帯電話端末⁶を歩行者端末として利用する方式、路側機を介さず歩行者と車が直接通信する方式等が考えられている。また、ドライバーに歩行者の接近を通知するだけではなく、歩行者にも車の接近を通知するシステムも考えられている。しかし、いずれにせよ、このシステムを実用に供する上での最も重要な技術的課題の1つは、事故に繋がる蓋然性の高い情報のみを抽出してドライバーに通知する等、適切なマン・マシンインターフェイスの構築にあると言われている(竹内・前田(2006))。

III 市場均衡普及率とその動学的性質

以上、歩車協調安全システムのシステム概要をみたが、本稿は、マン・マシンインターフェイス等の技術的問題点には踏み込まない。こうした問題はすべて解決されたとの前提で分析を進める。

上述したように、歩車協調安全システムでは、歩行者とドライバーの双方が、このシステムの為の特別な装置（或いは、新しい機能を搭載した携帯電話やカーナビ）を所持しなければならない。そして、装置を所持することによって得られる便益は、相手側の装置の普及率に依存する。ここでは、ネットワーク外部性を扱った Rohlfs(1974)、林(1992)のモデルをより一般化したモデルを用いて、歩車協調安全システムの市場均衡普及率とその動学的性質について理論的な分析を行う。

利用するモデルの基本形は、ゲーム論的に表現すると次のようなものである。まず、ゲームのプレイヤーは、すべての歩行者とすべてのドライバーである。歩行者の戦略空間は歩行者端末を {利用する、利用しない} という2つの戦略から構成され、利得は、各ドライバーの戦略の関数としての消費者余剰である。同様に、ドライバーの戦略空間は、車載器を {利用する、利用しない} という2つの戦略から構成され、利得は、各歩行者の戦略の関数としての消費者余剰である。各歩行者、ドライバー共に、自分以外のプレイヤーの利得関数を知らず、自分以外のプレイヤーは、1期前に選んだ戦略を次の段階でも選択するというナイーブな期待の下でこの期待形成については幾分の修正を加えるが、今期の戦略を選択する。そしてこの非協力ゲーム同時手番ゲームは、各プレイヤーの予測が、自己充足的な予測(self-fulfilling expectation)となるまで、即ち、各プレイヤーの予測が、実際に選ばれる戦略に一致するまで無限に繰り返される。そして、最終的な市場均衡普及率はこのスーパーゲームの定常均衡普及率、即ち、ナッシュ均衡点として捉えられる。

1. 主な仮定

ここでは、まず、本稿の分析モデルの主な仮定を述べる。

(1) 利用判別式

本稿では、分析をシンプルにするために、歩行者端末と車載器は、別の財であると仮定して分析を進める。実用化の段階では、歩行者端末が車載器の機能（の一部）を合わせ持つことも考えられる。しかし、実際のところ、歩行者端末を所持するのは児童や後期高齢者が大部分を占めると予想され、1つの歩行

者端末が車載器（の一部）を兼ねて使用されることは少ないと考えられる。したがって、この仮定は、分析結果の妥当性に問題を投じるものではないと判断する。

次に、本稿では、すべての歩行者とすべてのドライバーは、それぞれ同質であると仮定する。歩行者でみると、歩行者の利得は、上述したように、各ドライバーの戦略（即ち、各ドライバーの車載器の利用の有無）の関数である。しかし、この仮定によって、各歩行者の利得は、各ドライバーの戦略の関数ではなく、車載器の普及率の関数として単純に表現できることになる。同様に、各ドライバーの利得は、この仮定によって、歩行者端末の普及率の関数として単純に表現できることになる。

以上の仮定の下、ある歩行者 i （多くの場合、歩行者 i の保護者）が、歩行者端末を利用するかどうかは、次のような判別式によって決定するものとする。

$$\begin{cases} u_{f,i}^{p_v^e} = p_v^e u_{f,i} < c_f & \rightarrow \text{利用しない} \\ u_{f,i}^{p_v^e} = p_v^e u_{f,i} \geq c_f & \rightarrow \text{利用する} \end{cases} \quad (1f)$$

$u_{f,i}$ は、車載器の普及率が1のとき、歩行者 i が端末を一定期間（以降、1期とよぶ）利用することによって得る便益を指す。

p_v^e ($0 \leq p_v^e \leq 1$)は、車載器の普及率に関する歩行者の期待を示す。すべての歩行者の期待は等しいと仮定する。

$u_{f,i}^{p_v^e}$ は、車載器の期待普及率が p_v^e のときに、歩行者 i が歩行者端末を1期利用することによって得られると期待する便益を示す。そして、期待便益は、車載器の期待普及率に比例して変化すると仮定する。

c_f は、歩行者端末のレンタル価格である。ここでは、歩行者端末の生産関数は規模に関して収穫一定であり、また、レンタル価格は歩行者端末価格を耐用期間数で除したものに等しいと仮定する。この仮定の下、レンタル価格は普及率に関わりなく一定値となる⁷。なお、本稿では、歩行者端末や車載器が買い取り方式の場合についても、適宜言及する。

以上から、判別式(1f)は、歩行者 i は、歩行者端末の利用による期待便益が c_f 以上であれば歩行者端末を利用し、期待便益が c_f より小さければ端末を利用しないことを示す。

一方、各ドライバーの車載器の利用の判別については、上述した仮定の下、歩行者と数学的に対称的な表現が可能となる。即ち、あるドライバー j が、車載器を利用するかどうかは、次のような判別式に依る。

$$\begin{cases} u_{v,j}^{p_f^e} = p_f^e u_{v,j} < c_v & \rightarrow \text{利用しない} \\ u_{v,j}^{p_f^e} = p_f^e u_{v,j} \geq c_v & \rightarrow \text{利用する} \end{cases} \quad (1v)$$

p_f^e : 歩行者端末の期待普及率(ドライバーの期待) ($0 \leq p_f^e \leq 1$)、 $u_{v,j}$: 歩行者端末の普及率が 1 のときに、ドライバー j が車載器を 1 期利用することによって得る便益、 $u_{v,j}^{p_f^e}$: 歩行者端末の期待普及率が p_f^e のときに、ドライバー j が車載器を 1 期利用することによって得られると期待する便益、 c_v : 車載器のレンタル価格。

このように、歩行者の歩行者端末利用判別と、ドライバーの車載器利用判別は、数学的に対称的な性質を持つので、以下では歩行者端末を中心に説明する。

(2) 普及率に関する期待形成

車載器の普及率に関する歩行者の期待 p_v^e は、車載器の 1 期前の実際の普及率の関数として、

$$p_v^e = E_v(p_{v,-1}) \quad (2v)$$

と表せるものと仮定する。そして、 $\frac{d}{dp_{v,-1}} E_v \geq 0$ を仮定する。

同様に、歩行者端末の普及率に関するドライバーの期待 p_f^e は、歩行者端末の 1 期前の実際の普及率の関数として、

$$p_f^e = E_f(p_{f,-1}) \quad (2f)$$

と表せるものと仮定する。そして、 $\frac{d}{dp_{f,-1}} E_f \geq 0$ を仮定する。

2. 需要関数

歩行者端末の利用によって得られる便益は個人によって異なる。車載器に対するある期待普及率の下、期待便益 $u_{f,i}^{p_f^e}$ の大きい歩行者から順番に、1, 2, …, n と番号を付け、横軸を歩行者番号、縦軸を歩行者の便益としてプロットすると、歩行者端末の需要曲線が描ける。横軸を歩行者から普及率 p_f ($0 \leq p_f \leq 1$) に変換すると、歩行者端末の逆需要関数（限界便益関数）は、

$$u_f = D_f(p_f^e, p_f) = a_f p_f^e U_f(p_f) \quad (3f)$$

と表せる。ここで、 a_f は、歩行者端末に最も高い価値を見いだす歩行者の、車載器の普及率が 1 のときの便益水準を示す。 $U_f(p_f)$ は、車載器の普及率が 1 のときの各歩行者の便益を a_f で基準化し (= $u_{f,i}/a_f$)、それを大きい順に並べ、横軸を個人番号から歩行者端末の普及率 p_f に変換したものである。この定義によ

り、 $U_f(0) = 1$ 、 $\frac{d}{dp_f} U_f(p_f) \leq 0$ となる。

なお、車載器の逆需要関数（限界便益関数）は、歩行者端末と対称的に、次の通りとなる。

$$u_v = D_v(p_f^e, p_v) = a_v p_f^e U_v(p_v) \quad (3v)$$

p_v : 車載器の普及率、 a_v : 車載器に最も高い価値を見いだすドライバーの、歩行者端末の普及率が 1 のときの便益。この定義により、 $U_v(0) = 1$ 、

$$\frac{d}{dp_v} U_v(p_v) \leq 0。$$

3. 各期の普及率と最小普及率

(1) 各期の普及率と最適反応曲線

(3f)と(2v)より、歩行者端末の各期の普及率 $p_{f,t}$ は、次のような階差方程式の解として示すことができる。

$$\begin{aligned}
F_f(p_{v,t}^e, p_{f,t}, c_f) \Big|_{p_{v,t}^e = E_v(p_{v,t-1})} &= \frac{1}{a_f} (D_f(p_{v,t}^e, p_{f,t}) \Big|_{p_{v,t}^e = E_v(p_{v,t-1})} - c_f) \\
&= E_v(p_{v,t-1})U_f(p_{f,t}) - r_f = 0, \quad r_f = \frac{c_f}{a_f}
\end{aligned} \tag{4f}$$

r_f は、歩行者端末に最も高い価値付けを行う歩行者の、車載器の普及率が1の時の便益と、歩行者端末のレンタル価格の比であり、通常は $r_f < 1$ となる。

ここで、(4f)が、次のような関数 G_f を陰伏的に定義すると仮定する。

$$p_{f,t} = G_f(p_{v,t-1}, r_f) \tag{5f}$$

上では、本稿のモデルを、すべての歩行者とすべてのドライバーをプレイヤーとするゲームとして記述した。しかし、実のところこのゲームは、歩行者代表とドライバー代表の2人をプレイヤーとし、歩行者代表の戦略空間と利得は、それぞれ、歩行者端末の利用率 (= 普及率) と歩行者全体の消費者余剰の総和、一方、ドライバー代表の戦略空間と利得は、それぞれ、車載器の利用率 (= 普及率) とドライバー全体の消費者余剰の総和、とするゲームに他ならない。この関数は、このように定式化したゲームにおける、歩行者代表の最適反応曲線である。ここで、歩行者の最適反応曲線の傾き $\frac{\partial p_{f,t}}{\partial p_{v,t-1}}$ を求めると、

$$\frac{\partial p_{f,t}}{\partial p_{v,t-1}} = - \frac{\frac{\partial F_f}{\partial p_{v,t-1}}}{\frac{\partial F_f}{\partial p_{f,t}}} = - \frac{U_f(p_{f,t}) \frac{dE_v}{dp_{v,t-1}}}{E_v(p_{v,t-1}) \frac{dU_f}{dp_{f,t}}} = - \frac{p_{f,t}}{p_{v,t-1}} \frac{\eta_{E_v}(p_{v,t-1})}{\eta_{U_f}(p_{f,t})} \tag{6f}$$

η_{U_f} 、 η_{E_v} は、それぞれ、 U_f と E_v の点弾力性である。定義により $\eta_{U_f} \leq 0$ 、仮定により $\eta_{E_v} \geq 0$ であるから、歩行者の最適反応曲線の傾き $\frac{\partial p_{f,t}}{\partial p_{v,t-1}}$ は非負である。

なお、歩行者端末の(4f)、(5f)、(6f)に対応する車載器の式は、それぞれ、(4v)、(5v)、(6v)となる。

$$\begin{aligned}
F_v(p_{f,t}^e, p_{v,t}, c_v) \Big|_{p_{f,t}^e = E_f(p_{f,t-1})} &= \frac{1}{a_v} (D_v(p_{f,t}^e, p_{v,t}) \Big|_{p_{f,t}^e = E_f(p_{f,t-1})} - c_v) \\
&= E_f(p_{f,t-1})U_v(p_{v,t}) - r_v = 0 \quad r_v = \frac{c_v}{a_v}
\end{aligned} \tag{4v}$$

$$p_{v,t} = G_v(p_{f,t-1}, r_v) \quad (5v)$$

$$\frac{\partial p_{v,t}}{\partial p_{f,t-1}} = - \frac{p_{v,t}}{p_{f,t-1}} \frac{\eta_{E_f}(p_{f,t-1})}{\eta_{U_v}(p_{v,t})} \quad (6v)$$

歩行者端末と同様に、ドライバーの最適反応曲線の傾き $\frac{\partial p_{v,t}}{\partial p_{f,t-1}}$ は非負である。

(2) 最小普及率

(4f)において、

$$F_f(p_v^{e \min}, 0, c_f) \Big|_{p_v^{e \min} = E_v(p_v^{e \min})} = 0, \quad \text{即ち、} E_v(p_v^{e \min}) = r_f \quad (7f)$$

を満たす車載器普及率 $p_v^{e \min}$ ($0 \leq p_v^{e \min} \leq 1$) が存在すると仮定する。 $p_v^{e \min}$ は歩行者端末をレンタルする歩行者が存在するための、車載器の最小普及率を意味する。車載器の普及率がこれを下回れば、歩行者端末をレンタルするものはいない。

同様に、(4v)より、歩行者端末の最小普及率 $p_f^{e \min}$ が算出できる。

$$F_v(p_f^{e \min}, 0, c_v) \Big|_{p_f^{e \min} = E_f(p_f^{e \min})} = 0, \quad \text{即ち、} E_f(p_f^{e \min}) = r_v \quad (7v)$$

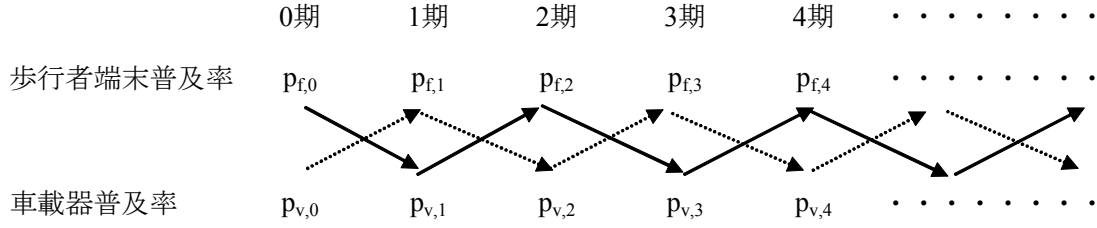
4. 普及率の動的変化

ドライバーの最適反応曲線(5v)で決定される各期の車載器の市場均衡普及率 $p_{v,t}$ と、歩行者の車載器に対する期待普及率 $p_{v,t}^e$ とが一致する保証はない。不一致があれば、歩行者は期待を改定し、歩行者端末の需要曲線(3f)はシフトする。(5v)を(4f)に、(5f)を(4v)に代入すると、次のような階差方程式を得る。

$$H_f(p_{f,t}, p_{f,t-2}, r_f, r_v) = E_v(p_{v,t-1})U_f(p_{f,t}) \Big|_{p_{v,t-1} = G_v(p_{f,t-2}, r_v)} - r_f = 0 \quad (8f)$$

$$H_v(p_{v,t}, p_{v,t-2}, r_v, r_f) = E_f(p_{f,t-1})U_v(p_{v,t}) \Big|_{p_{f,t-1} = G_f(p_{v,t-2}, r_f)} - r_v = 0 \quad (8v)$$

(8f)(8v)から分かるように、歩行者端末と車載器は共に、今期の普及率は2期前の自らの普及率に影響を受ける。しかし、1期前の普及率からは影響を受けない。歩行者端末で図示すれば、図2の通り、各期の普及率は次の2つの系列を合成したものとなる。



注) 太線の系列： $p_{f,0} \rightarrow (p_{v,1}) \rightarrow p_{f,2} \rightarrow \dots$

点線の系列： $(p_{v,0}) \rightarrow p_{f,1} \rightarrow (p_{v,2}) \rightarrow p_{f,3} \rightarrow \dots$

図 2 歩行者端末の普及率の 2 つの系列

(8f)より、横軸を歩行者端末の 2 期前の普及率 $p_{f,t-2}$ 、縦軸を歩行者端末の今期の普及率 $p_{f,t}$ とする位相図が描ける。ここで、位相線の傾き α_f は、(8f) (6v) から次の通りとなる。

$$\begin{aligned}
 \alpha_f(p_{f,t}, p_{f,t-2}, p_{v,t-1}, r_v) &= \frac{\partial p_{f,t}}{\partial p_{f,t-2}} = - \frac{\frac{\partial H_f}{\partial p_{f,t-2}}}{\frac{\partial H_f}{\partial p_{f,t}}} = - \frac{U_f(p_{f,t}) \frac{dE_v}{dp_{v,t-1}} \frac{\partial p_{v,t-1}}{\partial p_{f,t-2}}}{E_v(p_{v,t-1}) \frac{dU_f}{dp_{f,t}}} \\
 &= - \frac{p_{f,t}}{p_{v,t-1}} \frac{\eta_{E_v}(p_{v,t-1})}{\eta_{U_f}(p_{f,t})} \frac{\partial p_{v,t-1}}{\partial p_{f,t-2}} \\
 &= \frac{p_{f,t}}{p_{f,t-2}} \frac{\eta_{E_v}(p_{v,t-1})}{\eta_{U_f}(p_{f,t})} \frac{\eta_{E_f}(p_{f,t-2})}{\eta_{U_v}(p_{v,t-1})} \quad (9f)
 \end{aligned}$$

定義により $\eta_{U_f} \leq 0$ 、 $\eta_{U_v} \leq 0$ 、仮定により $\eta_{E_v} \geq 0$ 、 $\eta_{E_f} \geq 0$ 、よって、歩行者端末の位相線の傾き α_f は、非負である。

同様に、車載器に関する位相線の傾き α_v は、

$$\alpha_v(p_{v,t}, p_{v,t-2}, p_{f,t-1}, r_f) = \frac{\partial p_{v,t}}{\partial p_{v,t-2}} = \frac{p_{v,t}}{p_{v,t-2}} \frac{\eta_{E_f}(p_{f,t-1})}{\eta_{U_v}(p_{v,t})} \frac{\eta_{E_v}(p_{v,t-2})}{\eta_{U_f}(p_{f,t-1})} \geq 0 \quad (9v)$$

となる。

5. 定常均衡普及率

ここで、(8f)、(8v)に定常均衡普及率 \bar{p}_f 、 \bar{p}_v が存在すると仮定する。定常均衡普及率 \bar{p}_f 、 \bar{p}_v は、(10f)、(10v)を満たす。

$$H_f(\bar{p}_v, \bar{p}_f, r_f, r_v) = E_v(\bar{p}_v)U_f(\bar{p}_f)|_{\bar{p}_v=G_v(\bar{p}_f, r_v)} - r_f = 0 \quad (10f)$$

$$H_v(\bar{p}_v, \bar{p}_v, r_v, r_f) = E_f(\bar{p}_f)U_v(\bar{p}_v)|_{\bar{p}_f=G_f(\bar{p}_v, r_f)} - r_v = 0 \quad (10v)$$

定常均衡普及率に達するまで、人々は、普及率に関する期待を改訂し需要曲線(3f)(3v)はシフトし続けるが、普及率がこの定常均衡普及率に到達すると、人々は期待普及率の改訂を行わなくなる。この定常均衡普及率は、ゲーム論的にみれば、歩行者の最適反応曲線(5f)とドライバーの最適反応曲線(5v)の交点、即ちナッシュ均衡点に他ならない。

ここで、定常均衡普及率における、ドライバーの最適反応関数の傾き(6v)と歩行者の最適反応関数の傾き(6f)の逆数の比を求めると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{v,t}}{\partial p_{f,t-1}} / \frac{1}{\frac{\partial p_{f,t}}{\partial p_{v,t-1}}} &= \frac{\partial p_{v,t}}{\partial p_{f,t-1}} \frac{\partial p_{f,t}}{\partial p_{v,t-1}} = \frac{\eta_{E_v}(\bar{p}_v)}{\eta_{U_f}(\bar{p}_f)} \frac{\eta_{E_f}(\bar{p}_f)}{\eta_{U_v}(\bar{p}_v)} \\ &= \alpha_f(\bar{p}_f, \bar{p}_f, \bar{p}_v, r_v) = \alpha_v(\bar{p}_v, \bar{p}_v, \bar{p}_f, r_f) \end{aligned} \quad (11)$$

が成立する。したがって、定常均衡普及率において、ドライバーの最適反応関数の傾き(6v)が、歩行者の最適反応関数の傾き(6f)の逆数よりも小さいならば、

$\alpha_f(\bar{p}_f, \bar{p}_f, \bar{p}_v, r_v) = \alpha_v(\bar{p}_v, \bar{p}_v, \bar{p}_f, r_f) < 1$ となり、定常均衡普及率は動学的に安定である。

一方、定常均衡普及率において、ドライバーの最適反応関数の傾きが、歩行者の最適反応関数の傾き(6f)の逆数よりも小さくないのならば、

$\alpha_f(\bar{p}_f, \bar{p}_f, \bar{p}_v, r_v) = \alpha_v(\bar{p}_v, \bar{p}_v, \bar{p}_f, r_f) \geq 1$ となり、定常均衡普及率は動学的に不安定である。

IV 図解

ここでは、上述した期待形成式 E_f 、 E_v 並びに需要関数 U_f 、 U_v に具体的な関数を設定して、定常均衡普及率とその動学的性質を図解する。

1. 期待形成式と需要関数の定式化

分析にあたって、車載器、歩行者端末双方の今期の期待普及率 $p_{v,t}^e$ 、 $p_{f,t}^e$ は、それぞれ、前期の市場普及率 $p_{v,t-1}$ 、 $p_{f,t-1}$ に等しいと仮定する。また、歩行者の歩行者端末利用による便益と、ドライバーの車載器利用による便益は、それぞれ、 $[a_f p_v^e(1 - b_f), a_f p_v^e]$ 、 $[a_v p_f^e(1 - b_v), a_v p_f^e]$ の区間に一様分布すると仮定する((3f')
を見よ)。この2つの仮定によって、歩行者端末に関する(2v) (3f) (4f) (7f) (8f) (10f) は次のように書き換えることができる。

$$p_{v,t}^e = p_{v,t-1} \quad (2v')$$

$$u_f = a_f p_v^e(1 - b_f p_f) \quad (3f')$$

$$p_{v,t-1}(1 - b_f p_{f,t}) - r_f = 0 \quad (4f')$$

$$p_{f,t} = \frac{1}{b_f} \left(1 - r_f \frac{1}{p_{v,t-1}}\right) \quad (5f')$$

$$p_v^{\min} = r_f \quad (7f')$$

$$\frac{1}{b_v} \left(1 - r_v \frac{1}{p_{f,t-2}}\right) (1 - b_f p_{f,t}) - r_f = 0 \quad (8f')$$

$$\frac{1}{b_v} \left(1 - r_v \frac{1}{p_f}\right) (1 - b_f p_f) - r_f = 0 \quad (10f')$$

そして、この時、

$$\eta_{U_f} = \frac{b_f p_f}{b_f p_f - 1} \quad (12f)$$

となる。

車載器についても、同様の仮定により、(2f) (3v) (4v) (7v) (8v) (10v)は次のように書き換えることができる。

$$p_{f,t}^e = p_{f,t-1} \quad (2f')$$

$$u_v = a_v p_f^e (1 - b_v p_v) \quad (3v')$$

$$p_{f,t-1} (1 - b_v p_{v,t}) - r_v = 0 \quad (4v')$$

$$p_{v,t} = \frac{1}{b_v} \left(1 - r_v \frac{1}{p_{f,t-1}} \right) \quad (5v')$$

$$p_f^{\min} = r_v \quad (7v')$$

$$\frac{1}{b_f} \left(1 - r_f \frac{1}{p_{v,t-2}} \right) (1 - b_v p_{v,t}) - r_v = 0 \quad (8v')$$

$$\frac{1}{b_f} \left(1 - r_f \frac{1}{p_v} \right) (1 - b_v p_v) - r_v = 0 \quad (10v')$$

そして、この時、

$$\eta_{U_v} = \frac{b_v p_v}{b_v p_v - 1} \quad (12v)$$

となる。

2. 基準ケース

ここでは、まず、 $b_f = b_v = 1$ 、 $r_f = 0.15$ 、 $r_v = 0.25$ として分析を行う。以下、このケースを基準ケースと呼ぶ。

(1) 最適反応曲線

図 3 の 2 つの太線は、歩行者の最適反応曲線 (*ReactionCurve_f*) (5f') とドライバーの最適反応曲線 (*ReactionCurve_v*) (5v') を描いたものである。

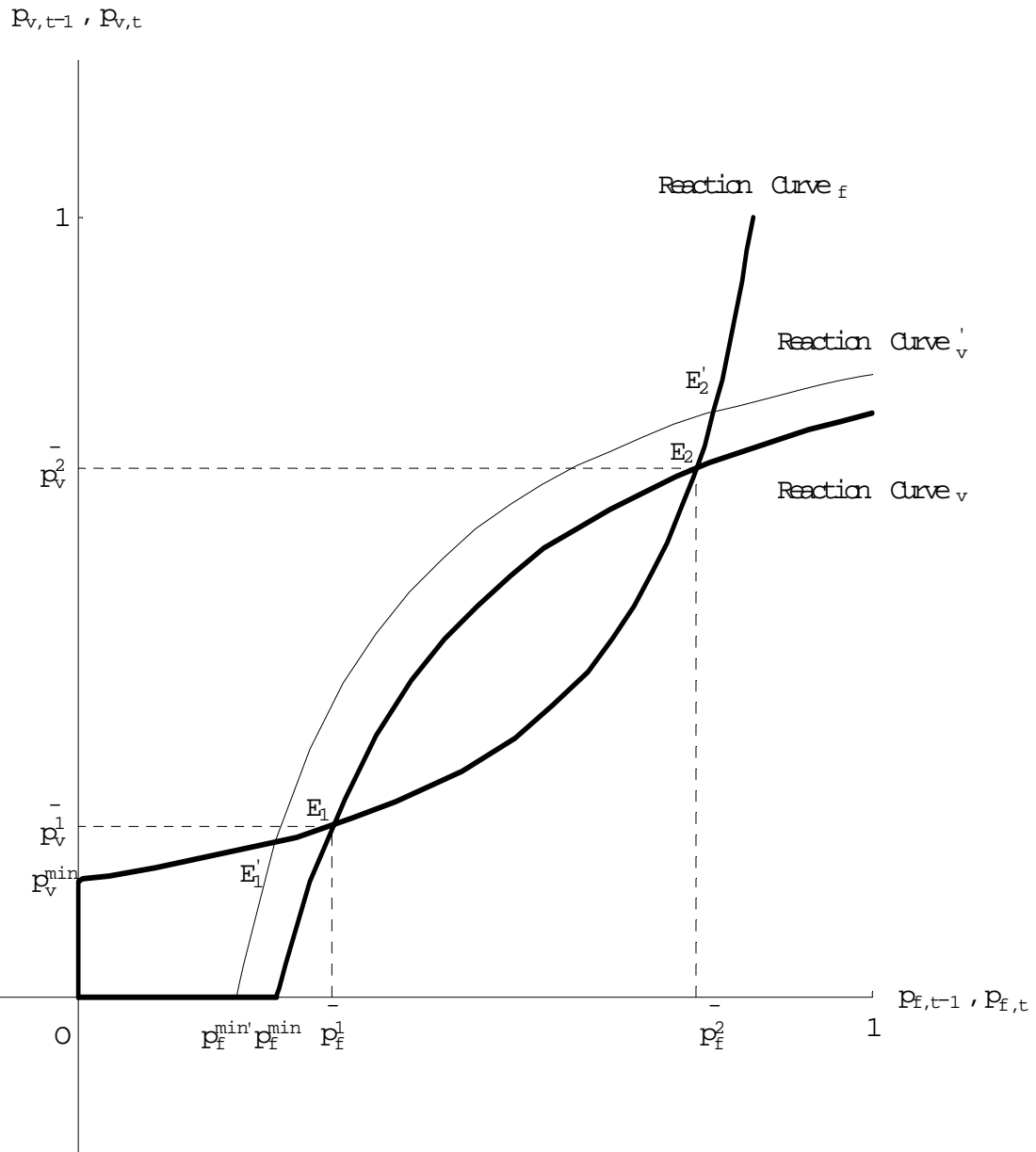
歩行者の最適反応曲線 (*ReactionCurve_f*) は、1 期前の車載器普及率 $p_{v,t-1}$ を説明

変数とし、今期の歩行者端末普及率 $p_{f,t}$ を被説明変数とする曲線であるが、ここではグラフを反転させ、横軸を歩行者端末普及率 $p_{f,t}$ 、縦軸を車載器普及率 $p_{v,t-1}$ 、として描いている。歩行者の最適反応曲線 ($ReactionCurve_f$) は車載器普及率 p_v^{\min} で縦軸と交差する。車載器普及率 p_v^{\min} は車載器の最小普及率を意味し、これは、(7f) より r_f に等しい。1期前の車載器普及率 $p_{v,t-1}$ がこの最小普及率を下回る限り、今期の歩行者端末普及率はゼロとなる。

一方、ドライバーの最適反応曲線 ($ReactionCurve_v$) は、1期前の歩行者端末普及率 $p_{f,t-1}$ を説明変数とし、今期の車載器普及率 $p_{v,t}$ を被説明変数とする曲線であり、ここでは、横軸を $p_{f,t-1}$ 、縦軸を $p_{v,t}$ として描いている。ドライバーの最適反応曲線 ($ReactionCurve_v$) は歩行者端末普及率 p_f^{\min} で横軸と交差する。歩行者端末普及率 p_f^{\min} は歩行者端末の最小普及率を意味し、これは、(7v') より r_v に等しい。1期前の歩行者端末普及率 $p_{f,t-1}$ がこの最小普及率を下回る限り、今期の車載器普及率はゼロとなる。

図3では、歩行者の最適反応曲線 ($ReactionCurve_f$) とドライバーの最適反応曲線 ($ReactionCurve_v$) は O 、 E_1 、 E_2 の3点で交差している。したがって、定常均衡普及率 (ナッシュ均衡) の組合せとしては、 $\{(0,0), (\bar{p}_f^1, \bar{p}_v^1), (\bar{p}_f^2, \bar{p}_v^2)\}$ の3つが存在する。但し、消費者余剰からみれば、 $O < E_1 < E_2$ であり、 E_2 が経済厚生上、望ましい均衡点となる。

いま、 r_v が低下したとしよう ($r_v' = 0.20$)。 r_v が低下するから、(7v') より、歩行者端末の最小普及率は p_f^{\min} から $p_f^{\min'}$ に低下し、ドライバーの最適反応曲線は細線の曲線 ($ReactionCurve_v'$) に上方シフトする。そしてこの結果、定常均衡点 E_1 、 E_2 は、それぞれ、 E_1' 、 E_2' にシフトする。



注) $b_f = b_v = 1$ 、 $r_f = 0.15$ 、 $r_v = 0.25$ 、 $r_v' = 0.20$ として図示している。

図 3 最適反応曲線 (基準ケース)

(2) 動学的性質

$E_1 (= (p_f^1, p_v^1))$ は、ネットワーク外部性の議論でクリティカル・マスと呼ばれる普及率に相当する。実際の普及率が僅かでもこの水準を上回れば、市場普及率は、自動的に $E_2 (= (p_f^2, p_v^2))$ に収束していく。このことを、位相図でみてみよう。

図 4の左図の細線の曲線 ($ReactionCurve_v$) と太線の曲線 ($PhaseLine_f$) は、それぞれ、2期前の歩行者端末普及率と1期前の車載器普及率との関係を示す最適反応曲線(5v')、2期前の歩行者端末普及率と今期の歩行者端末普及率との関係を示す位相線(8f)である。直線の細線は45度線である。図中のA、Bは、図3の E_1 、 E_2 に対応している。

一方、図 4の右図の細線の曲線 ($ReactionCurve_f$) と太線の曲線 ($PhaseLine_v$) は、それぞれ、2期前の車載器普及率と1期前の歩行者端末普及率との関係を示す最適反応曲線(5f)、2期前の車載器普及率と今期の車載器普及率との関係を示す位相線(8v')である。図中のC、Dは、図3の E_1 、 E_2 に対応している。

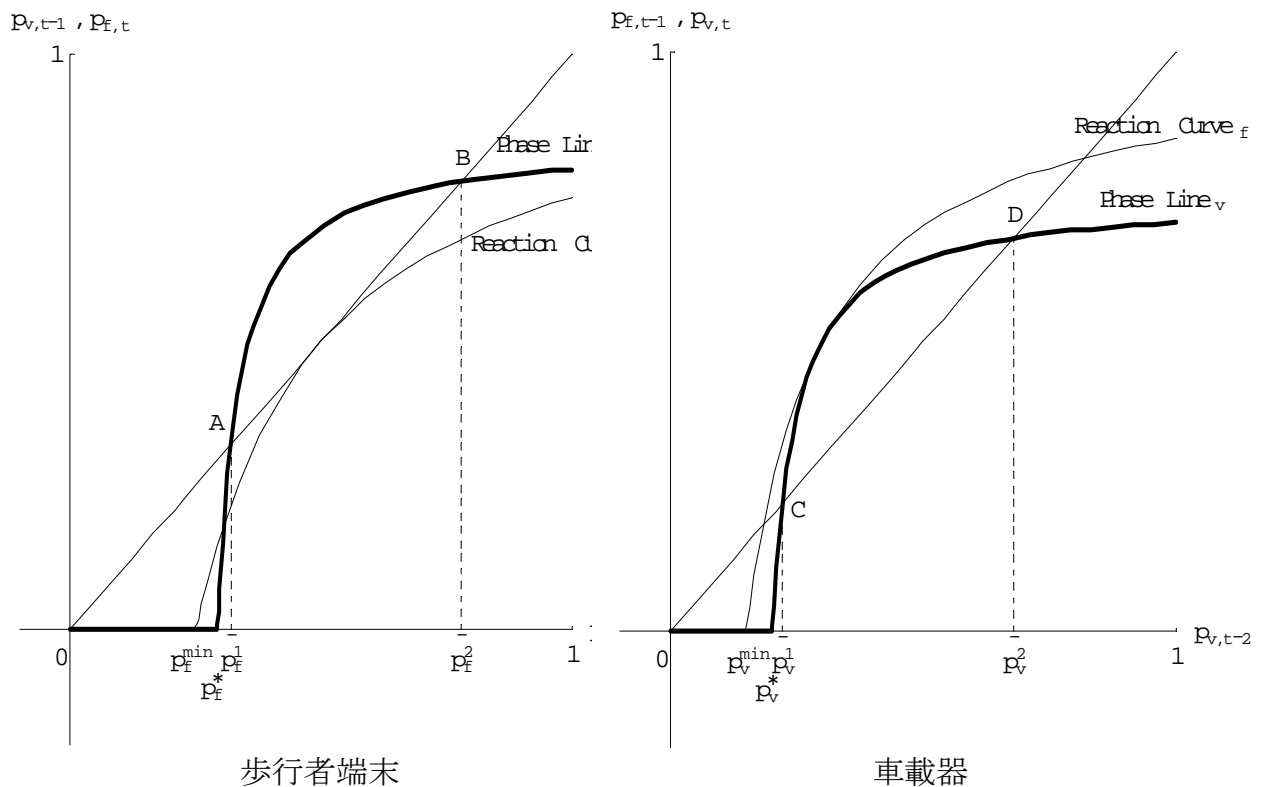
図 4の左図についてみると、 p_f^* は今期の歩行者端末普及率をゼロとするような2期前の歩行者端末普及率であり、 $p_f^{\min} < p_f^*$ である。図3の E_1 では、ドライバーの最適反応関数 ($ReactionCurve_v$) の傾き(6v)が、歩行者の最適反応関数 ($ReactionCurve_v$) の傾き(6f)の逆数よりも大きいから、(11)式より、歩行者端末の位相図の傾き α_f について、 $\alpha_f(p_f^1, p_f^1, p_v^1, r_v) > 1$ が成立する。したがって、 E_1 は動学的に不安定な均衡点である。一方、図3の E_2 では、ドライバーの最適反応関数 ($ReactionCurve_v$) の傾き(6v)が、歩行者の最適反応関数 ($ReactionCurve_v$) の傾き(6f)の逆数よりも小さいから、 $\alpha_f(p_f^2, p_f^2, p_v^2, r_v) < 1$ が成立する。したがって、 E_2 は動学的に安定な均衡点である。証明は割愛するが、位相線($PhaseLine_f$)は凹である。したがって、 $p_{f,t-2} < p_f^1$ の領域に $p_{f,t-2}$ が存在すれば、市場普及率はゼロに収束していく。一方、 $p_{f,t-2} > p_f^1$ の領域に

$p_{f,t-2}$ が存在すれば、市場普及率は \bar{p}_f^2 に収束していく⁸。したがって、歩行者端末、車載器双方の初期値($p_{f,0}, p_{v,0}$)が僅かにクリティカル・マスを超えているとすると、図 2 の 2 系列ともに(\bar{p}_f^2, \bar{p}_v^2)に収束する。歩行者端末でみれば、

図 2 の太線の系列： $p_{f,0} < p_{f,2} < \dots \rightarrow \bar{p}_f^2$

図 2 の点線の系列： $p_{f,1} < p_{f,3} < \dots \rightarrow \bar{p}_f^2$

となる。但し、この場合、 $p_{f,0} < p_{f,1} < p_{f,2} < p_{f,3}$ は成立せず、普及率は振幅運動する。しかし、振幅は、歩行者端末がレンタル方式で、歩行者が每期歩行者端末をレンタルするかどうかを決定する場合に生ずる特有の現象である。買い取り方式の場合は、一旦実現された最大の普及率で、普及率は下方硬直的となり、振幅運動は生じない。



注) $b_f = b_v = 1$ 、 $r_f = 0.15$ 、 $r_v = 0.25$ として図示している。

図 4 位相図 (基準ケース)

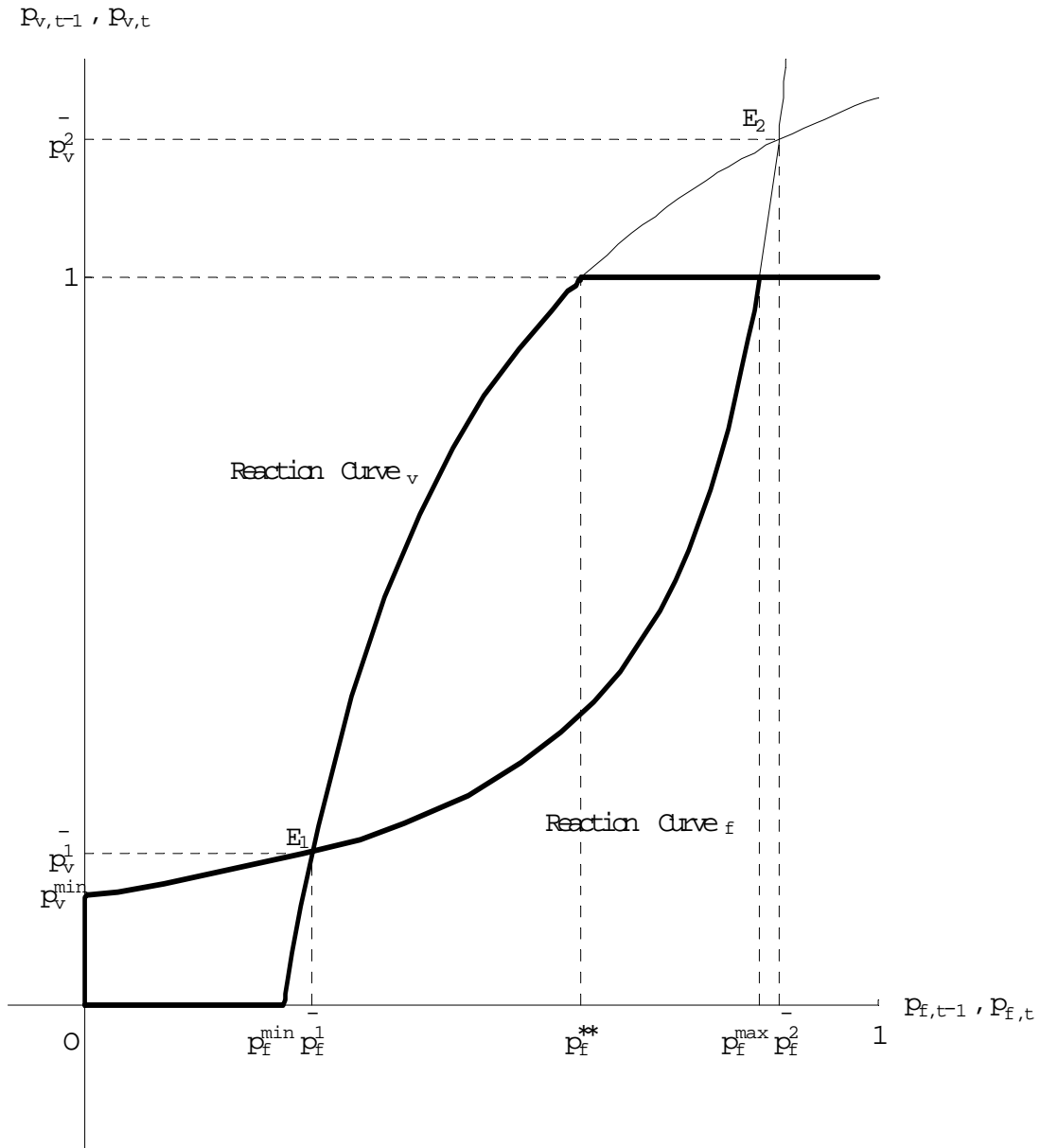
3. 非弾力的ケース

U_f の点弾力性 η_{U_f} または U_v の点弾力性 η_{U_v} の値如何によつては、定常均衡普及率は基準ケースのように2つ存在しない。これをみるため、ここでは、 $b_f = 1$ 、 $b_v = 0.6$ 、 $r_f = 0.15$ 、 $r_v = 0.25$ として分析を行う。このケースでは、 U_v は基準ケースより非弾力的である。以下、このケースを非弾力的ケースと呼ぶ。

(1) 最適反応曲線

図 5 は、非弾力的ケースの歩行者の最適反応曲線 ($ReactionCurve_f$) とドライバーの最適反応曲線 ($ReactionCurve_v$) を描いたものである。

このケースでは、定常均衡点は $O(= (0,0))$ と $E_1(= (\bar{p}_f^1, \bar{p}_v^1))$ の2つとなる。図 5 では、もう1つの定常均衡点として $E_2(= (\bar{p}_f^2, \bar{p}_v^2))$ が示されているが、この普及率は決して実現しない。何故なら、 \bar{p}_f^2 に対応する車載器の定常均衡普及率の理論値 \bar{p}_v^2 は1を超えるからだ。



注) $b_f = 1$ 、 $b_v = 0.6$ 、 $r_f = 0.15$ 、 $r_v = 0.25$ として図示している。

図 5 最適反応曲線 (非弾力的ケース)

(2) 動学的性質

E_1 では、ドライバーの最適反応関数 (*ReactionCurve_v*) の傾き ($6v$) が、歩行者の最適反応関数 (*ReactionCurve_f*) の傾き ($6f$) の逆数よりも大きいから、(11)式より、

歩行者端末の位相図の傾き α_f と車載器の位相図の傾き α_v について、

$\alpha_f(\bar{p}_f^1, \bar{p}_f^1, \bar{p}_v^1, r_v) = \alpha_v(\bar{p}_v^1, \bar{p}_v^1, \bar{p}_f^1, r_f) > 1$ が成立している。 E_1 は動学的に不安定なクリティカル・マスである。

図 5 の p_f^{**} は今期の車載器の普及率を 1 とするような 1 期前の歩行者端末の普及率である。そして、1 期前の歩行者端末の普及率 p_f^{**} に対応する 2 期後の歩行者端末の普及率は $p_f^{\max} (< \bar{p}_f^2)$ である。したがって、もし、 $\bar{p}_f^1 < p_{f,t-2} < p_f^{\max}$ の領域に $p_{f,t-2}$ が存在したとすれば、市場普及率の動的プロセスは $(p_f, p_v) = (p_f^{\max}, 1)$ に達した段階で終了する。

V 普及に向けての政策

最後に、クリティカル・マスが存在するとの仮定の下で、歩車協調安全システムを普及させるための政府の政策について考えてみよう⁹。

以上の分析で示したように、歩行者端末、車載器双方の普及率が一旦クリティカル・マスを超えると、持続的な普及メカニズムによって、双方の市場普及率は望ましい安定的な均衡点に達する。このことから、政策の第 1 として、政府は、クリティカル・マス水準を無償配布することが考えられる。但し、この場合、歩行者端末、車載器双方を無償配布する必要はない。車載器の普及率がゼロの段階で歩行者にクリティカル・マス水準 \bar{p}_f^1 の歩行者端末を無償配布した場合を考えてみよう。この場合、図 2 の 2 系列は、理論的には、

$$\text{図 2 の太線の系列： } p_{f,0} (= \bar{p}_f^1) < p_{f,2} < p_{f,4} \cdots \cdots \rightarrow \bar{p}_f^2$$

$$\text{図 2 の点線の系列： } p_{f,1} (= p_{v,0}) = p_{f,3} = p_{f,5} \cdots \cdots = 0$$

となる。しかし、クリティカル・マス水準 \bar{p}_f^1 の歩行者端末は無償配布されてい

るから、歩行者端末の普及率は \bar{p}_f^1 で下方硬直的であり、

$$\text{図 2の太線の系列： } p_{f,0}(= \bar{p}_f^1) < p_{f,2} < p_{f,4} \cdots \rightarrow \bar{p}_f^2$$

$$\text{図 2の点線の系列： } p_{f,1} = p_{f,3} = p_{f,5} \cdots = \bar{p}_f^1$$

となる。さらに、無償配布される歩行者端末を除き、歩行者端末が買い取り方式で購入される場合を考えると、一旦実現された最大の普及率で普及率は下方硬直的となるから、図 2の 2 系列は、

$$\text{図 2の太線の系列： } p_{f,0}(= \bar{p}_f^1) < p_{f,2} < p_{f,4} \cdots \rightarrow \bar{p}_f^2$$

$$\text{図 2の点線の系列： } p_{f,1} = p_{f,0}, p_{f,3} = p_{f,2}, p_{f,5} = p_{f,4} \cdots \rightarrow \bar{p}_f^2$$

となる。なお、当然のことながら、歩行者端末が望ましい普及率 \bar{p}_f^2 に収束する

のに並行して、車載器も望ましい普及率 \bar{p}_v^2 に収束する。

第 2 の政策として、インディカティブ・プランを導入し、歩行者端末または車載器の目標普及率を人々にアナウンスすることによって、普及率に対する人々の期待形成に影響を与えることが考えられる。一般的に、規模の経済が存在し、ポジティブ・フィードバック(Arthur, 1990)が働く経済では、均衡点の選択において、「歴史」と「期待」が大きな役割を果たすことが議論されてきた(Krugman, 1991; Matsuyama, 1991)。均衡選択における「期待」の役割は、経済主体が、複数均衡のうちの「望ましい均衡」が最終的な均衡になるという期待を持ち、その期待にしたがって行動すると実際に良い均衡が実現するという「期待の自己成就 (self-fulfilling expectation)」のメカニズムを通じて果たされる。このため、政府は、経済計画策定を通じたインディカティブ・プランニング(indicative planning)の導入によって民間の期待を調整することによって望ましい均衡点を政策的に実現することが可能となる。以下の議論は原理的にはこの考え方に準拠したものである。

ここでは、政府が歩行者端末について目標普及率を設定し、ドライバーの歩行者端末普及率に対する期待形成がこれによって影響を受ける場合を考える。そして、(2f)を次ぎのように書き換える。

$$p_{f,t}^e = E_f(p_{f,t-1}) = p_{f,t-1} + \delta_f(p_f^g - p_{f,t-1}) = (1 - \delta_f)p_{f,t-1} + \delta_f p_f^g \quad (2f')$$

ここで、 p_f^g は、政府の設定する歩行者端末の目標普及率、 δ_f ($0 < \delta_f \leq 1$)は、期待普及率 $p_{f,t}^e$ の政府の目標普及率 p_f^g への調整スピード（或いは政府の信用力）を表す。そして、この場合、 E_f の弾力性 $\eta_{E_f}(p_{f,t-1})$ は、

$$\eta_{E_f}(p_{f,t-1}) = \frac{(1-\delta_f)p_{f,t-1}}{(1-\delta_f)p_{f,t-1} + \delta_f p_f^g} < 1 \quad (13)$$

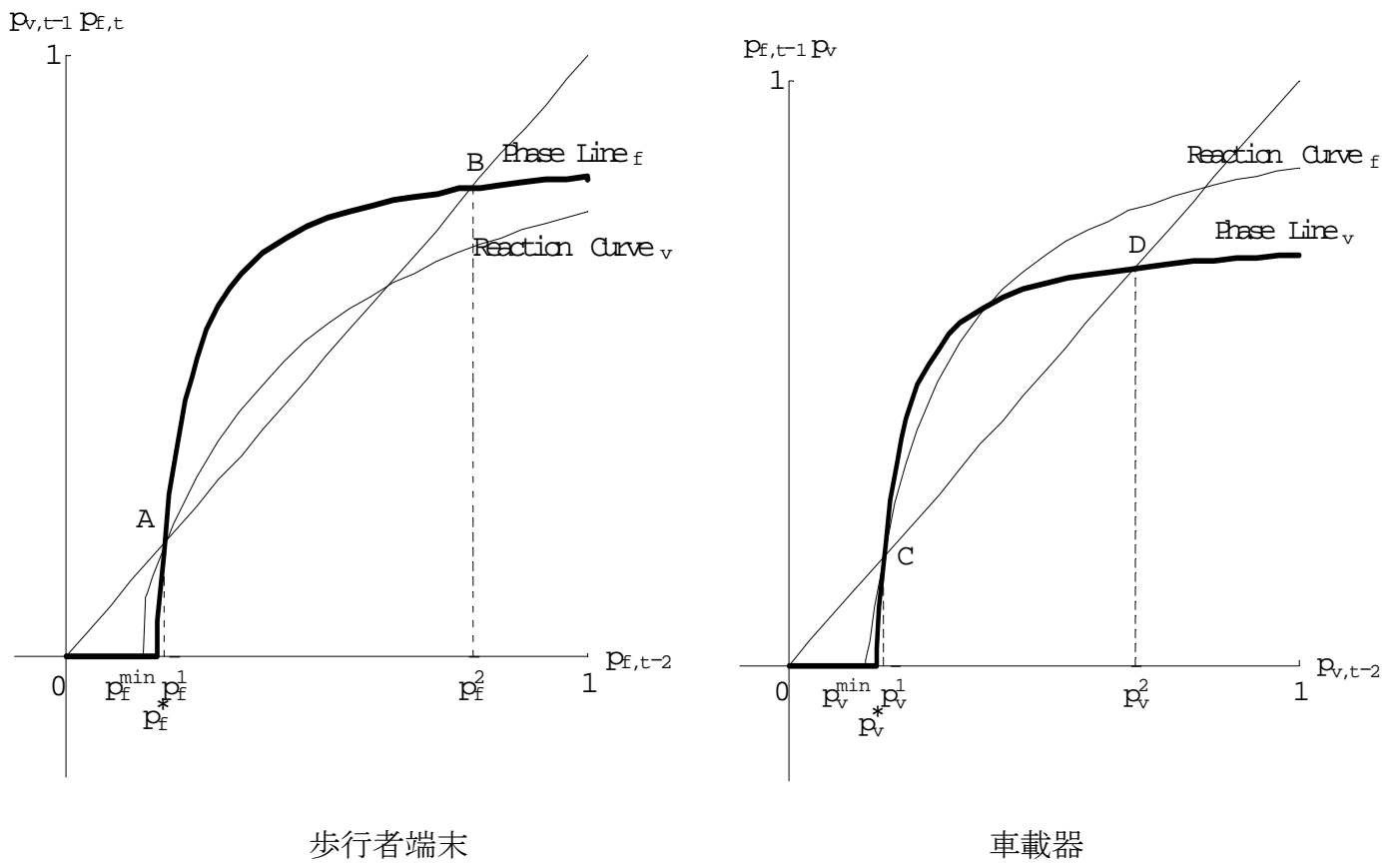
が成立する。前期の普及率を今期の期待普及率とする(2f)の場合、 $\eta_{E_f}(p_{f,t-1}) = 1$ であるから、基準ケースに比べて E_f の弾力性は必ず小さくなる。一方、(9f) (9v) から分かるように、 η_{E_f} が小さくなれば歩行者端末、車載器共に、位相線の傾きは小さくなる。

図 6は、基準ケースと同様に、 $b_f = b_v = 1$ 、 $r_f = 0.15$ 、 $r_v = 0.25$ とした上で、

$\delta_f = 0.2$ 、 p_f^g を基準ケースの望ましい普及率 \bar{p}_f^2 と等しいと置いた場合の、歩行者端末の位相図（左図）と車載器の位相図（右図）を描いたものである。双方とも、太線の曲線は、2期前の普及率と今期の普及率との関係を示す位相線、細線の曲線は、最適反応曲線である。位相線を見ると、位相線の勾配は基準ケース（図 4）に比べて幾分なだらかとなっている。これは、望ましい普及率 \bar{p}_f^2 、 \bar{p}_v^2 への収束時期が、政府の目標設定がない場合よりも早まることを意味する¹⁰。したがって、望ましい普及率への収束までに生じる死荷重も小さくなる。

もう1つ重要なのは、クリティカル・マスは、歩行者端末、車載器共に基準ケースより小さくなる ($\bar{p}_f^1 < \text{基準ケースの } \bar{p}_f^1$ 、 $\bar{p}_v^1 < \text{基準ケースの } \bar{p}_v^1$) という点である。これは、政府にとって、望ましい普及率を達成するために必要な無償配布の規模が小さくなること、即ち、財政コストが節減できることを意味する。

ところで、歩行者端末の目標普及率を設定した場合、政府は、歩行者端末、車載器のどちらを無償配布すべきかが問題となる。どちらの場合の費用が小さいかは、 \bar{p}_f^1 と \bar{p}_v^1 の水準、歩行者とドライバーの数、歩行者端末と車載器の価格に依るから一概にはいえない。しかし、政府の信用力を表す δ_f を高めるという観点から考えれば、歩行者端末を無償配布すべきということになる。



注) $b_f = b_v = 1$ 、 $r_f = 0.15$ 、 $r_v = 0.25$ 、 $\delta_f = 0.2$ 、 p_f^g =基準ケースの望ましい普及率 \bar{p}_f^2 、として図示している。

図 6 位相図 (政府が歩行者端末の目標普及率を設定したケース)

VI まとめ

以上、本稿では、ネットワーク外部性を扱った Rohlfs(1974)、林(1992)のモデルをより一般化したモデルを用いて、歩車協調安全システムの市場均衡普及率とその動学的性質について理論的な分析を行った。そして、この分析結果を踏まえ、歩車協調安全システムを普及させるための政府の政策を議論し、1) 歩行者端末と車載器のクリティカル・マスが存在するのであれば、政府はクリティカル・マスを僅かに超える歩行者端末（または車載器）を無償配布することによって、歩車協調安全システムの望ましい普及水準を達成することができること、2) インディカティブ・プランを導入し、車載器（または歩行者端末）の目標普及率を人々にアナウンスすることによって、クリティカル・マスを小さくし、無償配布に必要な財政コストを縮減できることを、を示した。

歩行者端末と車載器のどちらの目標普及率を設定するのか、そして、どの程度無料配布すべきか、さらには、誰を対象として配布すべきか等については、歩行者とドライバーの同質性の仮定を見直した上で、本稿のモデルパラメータに具体的な数値を設定した詳細な分析が必要であり、これについては稿を改めて論ずる。但し、政策の社会的受容性を考慮すれば、歩行者端末の目標普及率を設定した上で、幼稚園児や小学生低学年または後期高齢者に歩行者端末を配布する政策が、現段階では現実的ではないかと考える。

注：

¹ Levinson (2003)は、先行研究の結果（情報利用者の旅行時間短縮率、ドライバー全体の旅行時間短縮率）を纏めている。

² 2005年『交通事故統計』交通事故総合分析センター

³ 日本政府のIT戦略本部は、IT戦略本部(2006)において、歩行者・道路・車両による相互通信システムに必要な技術を、官民連携により、2010年を目途に開発するとしている。

⁴ ネットワーク外部性とは、Libenstein(1950)、Rohlf(1974)、Katz and Shapiro(1985,1994)が、それぞれ「バンドワゴン効果(bandwagon effect)」、「通信需要の相互依存性(independent demand for a communications service)」、「直接的ネットワーク外部性(direct externalities)」と呼んだものである。

⁵ 日産自動車(2005)、日経エレクトロニクス(2006)、竹内・前田(2006)を参照して記述。

⁶ 携帯電話端末にICタグや歩行者の挙動を把握するための装置を内蔵したもの。

⁷ 携帯電話端末に特別な装置を内蔵して歩行者端末とするような場合は、 c_f は、歩行者端末の機能を持つ携帯電話端末のレンタル価格と、歩行者端末の機能を持たない通常の携帯電話端末のレンタル価格の差と考えればよい。車載器についても同様である。

⁸ この動学的性質は図3からも分かる。 E_1 では、ドライバーの最適反応関数 ($ReactionCurve_v$) の傾き(6v)が、歩行者の最適反応関数 ($ReactionCurve_f$) の傾き(6f)の逆数よりも大きく、 E_2 では逆となっている。言い換えれば、 $\bar{p}_f^1 < p_{f,t-1} < \bar{p}_f^2$ の領域で、ドライバーの最適反応関数は、反転させて描いた歩行者の最適反応関数の上方に位置する。したがって、たとえば、 $\bar{p}_f^1 < p_{f,t-1} < \bar{p}_f^2$ の領域に $p_{f,t-1}$ が存在すれば、 $p_{f,t-1} \rightarrow p_{v,t} \rightarrow p_{f,t+1}$ の反応プロセスを通して、必ず、 $p_{f,t-1} < p_{f,t+1}$ となり、歩行者端末の普及率は \bar{p}_f^2 に近づいていく。

⁹ 以上の分析結果は、期待形成式 E_f 、 E_v 並びに需要関数 U_f 、 U_v に特別な関数を設定した場合の結果であって、一般的には、クリティカル・マスが必ず存在するわけではない。

¹⁰ 基準ケースの望ましい普及率 \bar{p}_f^2 に、政府の設定する歩行者端末の目標普及率 p_f^g を設定した場合、このケースでの安定的な均衡点 \bar{p}_f^2 は、基準ケースの望ましい普及率 \bar{p}_f^2 と等しい。しかし、そのように設定しなかった場合、このケースでの安定的な均衡点 \bar{p}_f^2 は、基準ケースの望ましい普及率 \bar{p}_f^2 とは異なったものとなる。

参考文献：

福田大輔, 渡邊健, 屋井鉄雄 (2004): 「利用者間の相互依存性を考慮した ETC 車載器普及モデル」 『土木計画学研究・論文集』, 21, 463-72.

林敏彦(1992): 「ネットワーク経済の構造」 林敏彦/松浦克己編『テレコミュニケーションの経済学—寡占と規制の世界—』, 123-43., 東洋経済新報社

IT戦略本部『IT新改革戦略—いつでも、どこで、誰でもITの恩恵を実感できる社会の実現—』 2006年1月19日

<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/060119honbun.pdf>

「多様化する周波数帯 歩行者との通信も確立へ」 『日経エレクトロニクス』 2006年5月8日号, 98-102.

日産自動車「アイセイフティ®「交通安全サービス」実験について～子どもの存在をドライバーに知らせ、交通事故低減を目指す実験を開始～」、NISSAN PRESS RELEASE、2005年11月16日

<http://www.nissan-global.com/JP/NEWS/2005/STORY/051116-01-j.html>

竹内寛爾、前田征児(2006): 「ITSによる自動車の社会・環境負荷低減に向けて」 『科学技術動向』, 66, 8-22.

http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt066j/0609_03_featurearticles/0609fa01/200609_fa01.html

- Arthur, W.B.(1990): ‘Positive Feedbacks in the Economy’, *Scientific American*, 92-9.
- Ben-Akiva, M., A. Palma, and I. Kaysi (1991): ‘Dynamic Network Models and Drivers Information Systems’, *Transportation Research Part A*, 25, 251-66.
- Emmerink, R.H.M., K.W. Axhausen, P. Nijkamp, and P. Rietveld(1995): ‘Effects of Information in Road Transport Networks with Recurrent Congestion’, *Transportation*, 22, 21-53.
- Emmerink, R.H.M., E.T. Verhoef, P. Nijkamp, and P. Rietveld (1996): ‘Endogenising Demand for information in Road Transport’, *Annals of Regional Science*, 30, 201-22.
- Emmerink, R.H.M., E.T. Verhoef, P. Nijkamp, and P. Rietveld (1998): ‘Information Effects in Transport with Stochastic Capacity and Uncertainty Costs’, *International Economic Review*, 39, 89-109.
- Katz, M.L., and C. Shapiro (1985): ‘Network Externalities, Competition, and Compatibility’, *American Economic Review*, 75, 424-40.
- Katz, M.L., and C. Shapiro (1994): ‘Systems Competition and Network Effects’, *Journal of Economic Perspectives*, 8, 93-115.
- Koutsopoulos, H.N., and T. Lotan (1990): ‘Motorist Information Systems and Recurrent Traffic Congestion: Sensitivity Analysis of Expected Result’, *Transportation Research Record*, 1281, 145-58.
- Krugman, P. R. (1991): ‘History versus Expectations’, *The Quarterly Journal of Economics*, 106, 651-67.
- Levinson., D. (2003): ‘The Value of Advanced Traveler Information Systems for Route Choice’, *Transportation Research Part C*, 11, 75-87.
- Levinson., D., and E. Chang (2003): ‘A Model for Optimizing Electronic Toll Collection Systems’, *Transportation Research Part A*, 37, 293-314.
- Libenstein, H. (1950): ‘Bandwagon, Snob and Veblen Effects in the Theory of Consumer’s Demand’, *Quarterly Journal of Economics*, 64, 183-207.
- Lo, H., M. Hickman, B. Ran, J. Larson and S. Weissenberger (1995): ‘Route Guidance and Planning: Potential Benefits and Implications for Public-Private Partnerships’, *Proceedings of the ITS America Fifth Annual Conference*, 2, 767-75.
- Mahmassani, H., and R. Jayakrishnan (1991): ‘System Performance and User Response under Real-time Information in a Congested Traffic Corridor’, *Transportation Research Part A*, 25, 293-307.
- Matsuyama, K. (1991): ‘Increasing Returns, Industrialization, and Indeterminacy of Equilibrium’, *The Quarterly Journal of Economics*, 106, 617-50.

- Rohlf's, J.H.(1974): 'A Theory of Independent Demand for a Communications Service', *Bell Journal of Economics and Management Science*, 5, 16-37.
- Yang, H.(1998): 'Multiple Equilibrium Behavior and Advanced Traveler Information Systems with Endogenous Market Penetration', *Transportation Research Part B*, 32, 205-18.
- Yang, H.(1999): 'Evaluating the Benefit of a Combined Route Guidance and Road Pricing System in a Network with Recurrent Congestion', *Transportation*, 26, 299-322.
- Yang, H., and Q. Meng (2001): 'Modeling User Adoption of Advances Traveler Information Systems: Dynamic Evolution and Stationary Equilibrium', *Transportation Research Part A*, 35, 895-912.
- Yin, Y., and H. Yang (2003): 'Simultaneous Determination of the Equilibrium Market Penetration and Compliance Rate of Advanced Traveler Information Systems', *Transportation Research Part A*, 37, 165-81.
- Zang, R., and E.T. Verhoef (2005): 'A Monopolistic Market for Advanced Traveler Information Systems and Road Use Efficiency', *Transportation Research Part A*, 40, 424-43.