日本財政学会第 62 回大会発表原稿
「ITS サービスに対する課税と補助金」

著　者
氏名：三好　博昭
所属：同志社大学研究開発推進機構 技術・企業・国際競争力研究センター(ITEC)専任フェロー
所属先住所　：〒602-8580　京都市上京区今出川通烏丸東入
電話番号　　：075-251-3837
FAX 番号　　：075-251-3139
Mail　　：hmiyoshi@mail.doshisha.ac.jp

キーワード
ITS、VICS、外部性、ネットワーク外部性、最適普及水準、税、補助金

要旨
経済学的にみた ITS サービスの特色は、通常のサービスと異なり大きな消費の外部性を有するため社会的限界便益と私的限界便益とに乖離が生じ、市場に委ねただけでは、社会的に望ましい普及水準を達成することができないという点にある。

本稿は、ITSサービスを、一方向外部性、ネットワーク外部性という２つ外部性を軸に整理する(II)とともに、1)プラスの一方向外部性とマイナスのネットワーク外部性を有するサービス、2)一方向外部性はプラスであるがネットワーク外部性の符号が普及率によって変化するサービスの２類型について、需要曲線の性質、市場均衡普及水準と最適普及水準との乖離、最適普及水準達成に必要な税・補助金政策等を理論的に整理した(III)。

さらに、マイナスのネットワーク外部性を有するサービスとしてVICSを取り挙げ、その便益を詳細に分類するとともに、シミュレーションを行い、社会的限界便益や最適普及水準を計測した。そして、最適普及水準を達成するためには、VICSには課税が必要となる可能性があることを示した(IV)。

目　次

I　はじめに 4
II　ITSの外部性による分類 4
１．　外部性の概念 4
（1）　一方向外部性 4
（2）　ネットワーク外部性 5
２．　ITSサービスの外部性 5
（1）　VICS（Vehicle Information and Communication System） 5
（2）　ETC（Electronic Toll Collection） 6
（3）　プローブカー情報サービス 6
（4）　ASV（Advanced Safety Vehicle） 7
（5）　カルガモ走行 7
III　ネットワーク外部性と一方向外部性の双方を有するサービスの最適普及水準と税・補助金政策 8
１．　短期需要曲線、期待均衡需要曲線、「サービス加入者全体にとっての限界便益」　8
（1）　短期需要曲線 9
（2）　期待均衡需要曲線（長期需要曲線） 10
（3）　サービス加入者全体にとっての限界便益 11
２．　プラスの一方向外部性とマイナスのネットワーク外部性を有するサービスの最適普及水準と税・補助金政策 12
（1）　期待均衡需要曲線 ED とサービス加入者全体にとっての限界便益曲線 MPW の性質 12
（2）　最適普及水準達成のための税／補助金政策 13
３．　一方向外部性はプラスであるがネットワーク外部性の符号が普及率によって変化するサービスの最適普及水準と税・補助金政策 15
（1）　期待均衡需要曲線 ED とサービス加入者全体にとっての限界便益曲線 MPW の性質 15
（2）　最適普及水準達成のための税/補助金政策 17
（3）　期待普及率が最適普及水準の近傍にない場合の動学的安定性 19
IV　VICSの最適普及水準と税・補助金政策 21
１．　先行研究サーベイと本分析の独自性 21
２．　VICSの社会的便益 22
（1）　便益の分類 23
（2）　旅行時間短縮便益 24

３．　シミュレーションモデル 27
（1）　シミュレーションの枠組み 27
（2）　シミュレーションモデルの詳細 28
４．　シミュレーション結果 36
（1）　VICSの期待均衡需要曲線 ED 、装着車全体にとっての私的限界便益 MPW 、社会的限界便益 MSW 36
（2）　旅行時間短縮率の組合せと最適普及水準、市場普及水準、税/補助金水準 37
（3）　動学的安定性 40
Ⅴ　まとめ 41

I　はじめに

自動車は、その利便性の反面、大量消費に伴う様々な問題が 20 世紀後半から顕在化し、未だ抜本的な解決には至っていない。交通事故、環境汚染、交通混雑等の問題である。このような自動車交通の諸問題を解決するうえで、画期的な技術として近年注目を集めているのが ITS(Intelligent Transport Systems)である。ITS とは、事故や渋滞、環境問題など様々な問題を、最先端の情報通信や制御の技術を利用することによって解決し、併せてドライバーの快適な走行を実現しようとするものである。

本稿では、ITS サービスのいくつかを概観するが、経済学的にみた ITS サービスの特色を一言で言うなら、多くの ITS サービスは通常のサービスと異なり大きな外部性を有するため、社会的限界便益と私的限界便益とに乖離が生じ、市場に委ねただけでは社会的に望ましい普及水準を達成することができないという点にある。

以下、本稿は、ITS サービスの外部性に着目して、３つの分析を行う。

まず、第１に、対個人サービスを中心に、ITSサービスを、一方向外部性、ネットワーク外部性という２つの外部性を軸に整理する(II)。

第２に、1)プラスの一方向外部性とマイナスのネットワーク外部性を有するサービス、2)一方向外部性はプラスであるがネットワーク外部性の符号が普及率によって変化するサービス、の２類型について、需要曲線の性質、市場均衡普及水準と最適普及水準との乖離、最適普及水準達成に必要な税・補助金政策等を理論的に整理する(III) 。

第３に、プラスの一方向外部性とマイナスのネットワーク外部性を有するサービスとしてVICSを取り挙げ、その便益を詳細に分類するとともに、シミュレーションを行い、社会的限界便益や最適普及水準を計測する (IV)。

II　ITS の外部性による分類

ここでは、一方向外部性、ネットワーク外部性という２つ概念を軸に、ITS の外部性を考える。まず、外部性の概念について記述する。

１．外部性の概念

（1） 一方向外部性

一方向外部性とは、外部性の原因者と受益者（被害者）が異なる外部性を指す。

プラスの一方向外部性の例として屡々取り挙げられるのは、住居の「庭」である。住居に庭を有する者は、木や草花を育てたり観賞したりすることによっ

てその庭から便益を享受する。しかしながら、庭が存在することの便益は、庭の所有者内部には留まらない。当該住居の近隣に居住したり近隣を歩行したりする者も、この庭を観賞することによって、便益を享受することができるからである。しかし、近隣に居住したり近隣を歩行したりする者からは庭を観賞することの対価を徴収することはできない。したがって「庭」を有する者は、市場機構の枠組みをはみ出す効果を他の経済主体に対して及ぼすことになる。

（2） ネットワーク外部性

ネットワーク外部性とは、個人がある財・サービスから得る便益が、その財・サービスを消費する個人の人数に依存しているような場合を指す[i]。上述した一方向外部生とは異なり。外部性の原因者と受益者（被害者）は一致する。

電話サービスはプラスのネットワーク外部性を有する財・サービスの代表的な例である。何故なら、電話に加入することの便益は、電話加入者の人数が多くなればなるほど高まるからである。また、コンピュータソフトもプラスのネットワーク外部性を持つ。何故なら、ソフトは、それを使ってデータ交換できる相手が増えれば増えるほど、ユーザーの便益が高まるからである。しかし、新規の電話加入者やソフトの新規購入者は、彼らに行為によってプラスの効果を享受することになる既加入者や既購入者から対価を徴収することはできない。したがって電話サービスやソフトの購入者は、市場機構の枠組みをはみ出す効果を他の経済主体に対して及ぼすことになる。

２． ITS サービスの外部性

次に、一方向外部性、ネットワーク外部性という２つ概念を軸に、ITS サービスの外部性を考えてみる。ここでは、対個人向けサービスとして、VICS、ETC、ASV、プローブカー情報サービス、カルガモ走行を取り挙げる。

（1） VICS（Vehicle Information and Communication System）

VICS は、FM 多重放送や道路上の発信機から受信した交通情報を図形・文字で表示するシステムである。VICS センターで編集・処理された渋滞や交通規制などの道路交通情報は自動車にリアルタイムに送信され、その情報は、カーナビゲーションシステムに用意されている地図の上に重ね書きして表示される。渋滞箇所が表示されるため、VICS ユーザーは渋滞箇所を避けて自動車を運行することができ、旅行時間の短縮、ガソリン消費等走行経費の削減といった便益を享受することができる。

外部性から VICS をみると、まず、VICS はプラスの一方向外部性を有する。即ち、VICS ユーザーが最適な走行経路を選択することによって、道路渋滞が緩

和され、その結果、VICS を利用しない自動車ユーザーの旅行時間や走行経費も同時に削減されるからである。

次に、ネットワーク外部性であるが、VICS の場合、上述した電話ワービスやコンピュータソフトの例とは逆に、その符号はマイナスとなる。いま、ある出発地からある目的地に到達するのに A、B 2つのルートがあったとしよう。そしてルート A はルート B よりも混雑しているものとしよう。この場合、VICS ユーザーは道路交通情報によってルート B を選択する。しかし、VICS ユーザーが増加するにつれて、ルート B を選択するドライバーは増加し、ルート B は徐々に混雑していく。VICS ユーザーは、自分自身以外のユーザーの数がゼロの場合に最も大きな便益を享受でき、自分自身以外のユーザーの数が増加するにつれて、享受できる便益は減少していく。

（2） ETC（Electronic Toll Collection）

ETC とは、高速道路の料金所ゲートに設置したアンテナと、車両に装着した車載器との間で無線通信を行うことによって自動的に料金を収受し、ドライバーが料金所をノンストップで走行することができるシステムである。

このサービスには、プラスの一方向外部性が存在する。なぜなら、ETC ユーザーの存在によって、ETC 車載器を搭載しない車の料金所渋滞も緩和されるからである。一方、ETC ゲート数が一定ならば、ネットワーク外部性は普及水準が低い段階ではゼロであるが、普及水準が高い段階ではマイナスとなる。なぜなら、ETC ユーザーが増加しすぎると、ETC ゲートが混雑し、ETC ユーザーは料金所をノンストップで通行することができなくなるからである。

（3） プローブカー情報サービス

プローブカーとは、車を無線ネットワークで繋ぎ、センサーに見立てて渋滞情報や天候情報を収集するというものである。本田技研工業㈱は、2003 年に、カーテレマティクスサービスである「インターナビ・プレミアムクラブ」で、自動車メーカーとしては世界初となるプローブカー情報による交通渋滞情報の提供を始めた。このサービスでは、会員車両をセンサーとし、車両から送信される走行速度や位置情報などを収集・分析し、道路交通情報を生成する。そして、会員の車が VICS からの交通情報が提供されていない道路を走行した際、フローブカー情報サービスを提供するのである。

このサービスには、プラスの一方向外部性が存在する。なぜなら、VICS 同様、プローブカーの存在によって、一般車両の渋滞も緩和されるからである。一方、ネットワーク外部性に関しては、普及率水準によってその符号が変化することが予想される。すなわち、普及率が低い段階では、プローブカーの増加に伴って収集する情報量が多くなり交通情報の精度が向上する結果、プローブカーの

旅行時間が短縮されるというプラスのネットワーク外部性が予想される。しかしながら、普及率が高くなると、VICS 同様、代替走行ルートの混雑度が高くなり、ネットワーク外部性はマイナスになると考えられる。

（4） ASV（Advanced Safety Vehicle）

ASV とは、エレクトロニクス技術を応用して高知能化し、安全性を高めた自動車のことである。具体的には、同一レーン上の先行車を検知し、ブレーキ制御を行いながら車間距離を一定に保つ車速/車間制御、先行車と追突の危険がある場合に、ドライバーのブレーキ操作を支援する追突速度低減システム、道路の白線を検知し、車線から逸脱する可能性がある場合はドライバーに注意を促す車線維持制御等がある。

追突速度低減システムを例にとると、このサービスにはプラスの一方向外部性が存在する。なぜなら、ASV ユーザーが存在することによって、他の自動車に、後方からの追突事故が減少するという便益が生じるからである。一方、このサービスには、ネットワーク外部性は存在しない。なぜなら、ASV ユーザーがいくら増加しても、ある ASV ユーザーの前方追突事故の発生確率には、全く影響がないからである。

（5） カルガモ走行

車々間通信または路車間通信によって、複数の自動車が適切な車間距離を保ちながら、隊列走行する次世代の ITS サービスである。様々なスタイルが考えられているが、先頭車両以外は自動運転であり、運転者の疲労軽減や安全性の向上などが期待されている。

このサービスには、プラスの一方向外部性が存在する。なぜなら、カルガモ走行によって車間距離が適切に保たれる結果、道路空間が有効に活用され、他の自動車の走行速度も上昇するからである。一方、ネットワーク外部性もプラスである。カルガモ走行可能な自動車が増加すれば、カルガモ走行を行える機会がより増加するからである。

以上、ここでは、一方向外部性、ネットワーク外部性という２つ概念を軸に、幾つかのITSサービスの外部性を考えてみた。図 1は、以上の議論に基づき、一方向外部性、ネットワーク外部性を軸として、各ITSサービスをプロットしたものである。ITSサービスは、1)プラスの一方向外部性とプラスのネットワーク外部性を有するサービス（第１類型）、2)プラスの一方向外部性とマイナスのネットワーク外部性を有するサービス（第２類型）、3)一方向外部性はプラスであるがネットワーク外部性の符号が普及率によって変化するサービス（第３類型）の３類型に分類できる。

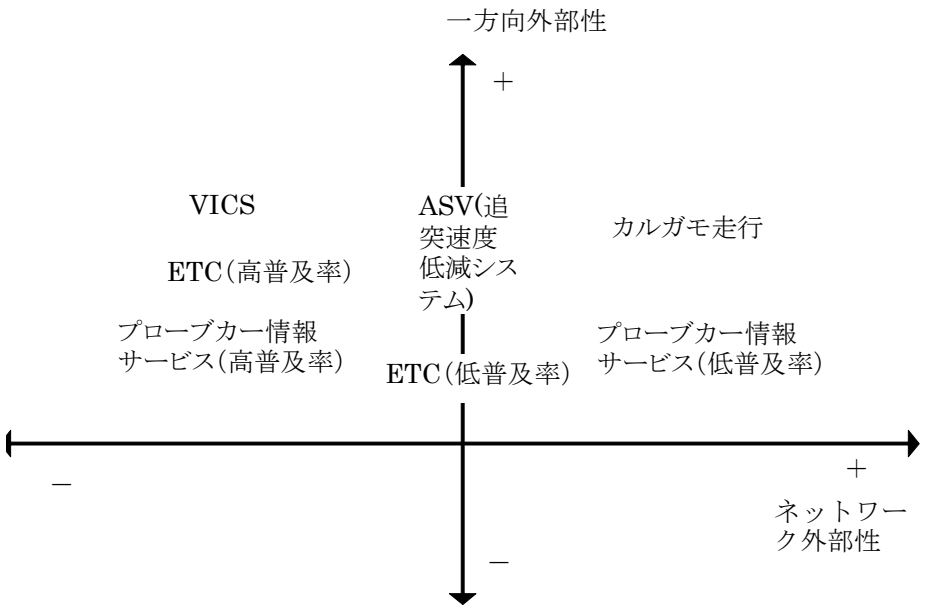


図 1　ITS サービスの外部性

III　ネットワーク外部性と一方向外部性の双方を有するサービスの最適普及水準と税・補助金政策

上では、一方向外部性、ネットワーク外部性という２つ概念を軸に、ITS サービスを３類型に分類した。

以下では、ネットワーク外部性と一方向外部性の双方を有するサービスの需要曲線の性質、最適普及水準等を整理するが、プラスのネットワーク外部性を有するサービスについては、Rohlfs(1974)、林(1992)等これまで数多くの研究が行われている。そこで、「プラスの一方向外部性とマイナスのネットワーク外部性を有するサービス（第２類型）」、「一方向外部性はプラスであるがネットワーク外部性の符号が普及率によって変化するサービス（第３類型）」に絞って議論を行う。

１．　短期需要曲線、期待均衡需要曲線、「サービス加入者全体にとっての限界便益」

まず、ネットワーク外部性を有するサービスの分析枠組みとして、短期需要曲線、長期需要曲線（期待均衡需要曲線）、「サービス加入者全体にとっての限界便益」の概念を定式化する[ii]。

（1） 短期需要曲線

さて、いま、ある個人iが、当該サービスに加入するかどうかを、次のような判別式によって決定するとしよう。

$$\begin{cases} u_{i,f} = g(f)u_{i,0} < c & \rightarrow \text{加入しない} \\ u_{i,f} = g(f)u_{i,0} \geq c & \rightarrow \text{加入する} \end{cases} \quad \cdots\cdots\cdots(1)$$

$f\ (0 \leq f \leq 1)$は、当該サービスの人々の期待普及率を示し、すべての個人の期待は等しいものと仮定する。

$u_{i,0}$は、個人iが当該サービスの加入から得ることのできる便益の最高値を示す。ネットワーク外部性がプラスなら、社会の成員が全て当該サービスに加入している場合に個人iは当該サービスの加入によって$u_{i,0}$の便益を得る。逆に、ネットワーク外部性がマイナスなら、誰も当該サービスに加入していない場合に、個人iは当該サービスの加入によって$u_{i,0}$の便益を得る。

$u_{i,f}$は、期待普及率がfであった場合に、個人iが当該サービスの加入から得られると予想する便益を示す。ここでは、$u_{i,f}$と$u_{i,0}$の比率はすべての個人に共通であり、関数$g(f)\ (0 \leq g(f) \leq 1)$で与えられるものと仮定する。

cは、当該サービスの利用費用である。ここでは、規模に関する収穫一定を仮定し、普及水準に関係なく一定であるとする。

以上から、判別式(1)は、ある期待普及率の下で期待される便益がc以上であれば、個人iは当該サービスに加入し、期待される便益がcより小さければ、個人iは当該サービスには加入しないことを示している。

ところで、サービスに加入することから得られる便益は個人によって異なる。ある期待普及率の下で大きな便益を有する個人から、順番に$1.2\ldots\ldots n$と番号を付け、横軸を個人番号、縦軸を個人の便益としてプロットすると、ある期待普及率の下での短期需要曲線が描ける。横軸を個人番号から普及率$p\ (0 \leq p \leq 1)$に変換すると、短期逆需要関数は、

$$u = u(f, p) = g(f)\, u_0(p) \quad \cdots\cdots\cdots(2)$$

となる。ここで、$u_0(p)$は、$u_{i,0}$を大きい順に並べ横軸を個人番号から普及率pに変換したものである。

なお、短期逆需要関数(2)と供給関数$(u = c)$の交点で決まる市場均衡普及率pは、期待普及率fと一致する保証はない。市場均衡普及率と期待普及率との間に乖離があれば、人々は期待を改訂し、短期逆需要曲線(2)はシフトする。本稿では、「短期」という言葉は、普及率に対する期待が改訂されない期間という意味で使用する。供給関数は長期、短期共に収穫一定を仮定する。

（2） 期待均衡需要曲線（長期需要曲線）

さて、いま、人々が前期の普及率を次期の期待普及率とするようなナイーブな期待形成を行うと仮定すれば、

$$f = p_{-1} \text{.....(3)}$$

となる。人々は、期待普及率と実際の普及率が一致しない限り、期待を改訂し短期需要曲線(2)はシフトし続ける。そして、各期の普及率は、次のような差分方程式の解として示すことができる。

$$F(f_t, p_t, c)|_{f_t=p_{t-1}} = u(f_t, p_t)|_{f_t=p_{t-1}} - c = g(p_{t-1})u_0(p_t) - c = 0 \text{....(4)}$$

まず、(4)式の定常均衡解の性質についてみてみよう。いま定常均衡値 $\bar{p}$ が存在すると仮定すると、この定常均衡解 $\bar{p}$ は、

$$F(\bar{p}, \bar{p}, c) = g(\bar{p})u_0(\bar{p}) - c = 0 \text{..... (5)}$$

を満たす。この定常均衡解の下では、需要と供給が一致し、且つ人々の期待普及率と実際の普及率は等しくなる。(5)式から、c の各水準に対応して $\bar{p}$ の水準が決まり、この普及水準ではもはや短期の需要曲線はシフトしないから、(5)式は長期の需要曲線（以下、期待均衡需要曲線 ED）を示している。

いま、期待均衡需要曲線 ED が微分可能であると仮定すると、この期待均衡需要曲線 ED の傾き $\frac{dc}{d\bar{p}}$ は、

$$\frac{dc}{d\bar{p}} = g(\bar{p})\frac{d}{d\bar{p}}u_0(\bar{p}) + u_0(\bar{p})\frac{d}{d\bar{p}}g(\bar{p}) = \frac{g(\bar{p})u_0(\bar{p})}{\bar{p}}\left(\frac{\bar{p}}{u_0(\bar{p})}\frac{d}{d\bar{p}}u_0(\bar{p}) + \frac{\bar{p}}{g(\bar{p})}\frac{d}{d\bar{p}}g(\bar{p})\right)$$

$$= \frac{g(\bar{p})u_0(\bar{p})}{\bar{p}}(\eta_{u_0}(\bar{p}) + \eta_g(\bar{p})) = \frac{c}{\bar{p}}(\eta_{u_0}(\bar{p}) + \eta_g(\bar{p})) \text{.....(6)}$$

となる。ここで、$\eta_{u_0}(\bar{p})$、$\eta_g(\bar{p})$は、$u_0(\bar{p})$と$g(\bar{p})$の$\bar{p}$における点弾力性である。$\frac{c}{\bar{p}} > 0$ であるから、期待均衡需要曲線 ED の傾きは、$u_0(\bar{p})$と$g(\bar{p})$の$\bar{p}$における点弾力性に依存する。

次に、(4)の差分方程式の解の動学的安定性条件を導こう。いま、(4)式が、関数（位相図） $p_t = h(p_{t-1}, c)$を陰伏的に定義していると仮定すれば、位相図の傾き $\frac{dp_t}{dp_{t-1}}$ は、

$$\frac{dp_t}{dp_{t-1}} = -\frac{\partial u}{\partial f_t}|_{f_t=p_{t-1}} / \frac{\partial u}{\partial p_t} = -u_0(p_t)\frac{d}{df_t}g(f_t)|_{f_t=p_{t-1}} / g(f_t)|_{f_t=p_{t-1}}\frac{d}{dp_t}u_0(p_t)$$

$$= -\frac{p_t}{f_t}\frac{\eta_g(f_t)}{\eta_{u_0}(p_t)}|_{f_t=p_{t-1}} \text{..... (7)}$$

となる。そして(7)式は定常均衡解 $\bar{p}$ においては、

$$\frac{dp_t}{dp_{t-1}}|_{p_t=p_{t-1}=\bar{p}} = -\frac{\eta_g(\bar{p})}{\eta_{u_0}(\bar{p})} \text{.....(8)}$$

となる。定常均衡解が、解近傍において動学的安定性を有するためには、$\left|\frac{dp_t}{dp_{t-1}}\right|_{p_t=p_{t-1}=\bar{p}}<1$（即ち、$|\eta_g(\bar{p})|<|\eta_{u_0}(\bar{p})|$）が成立しなければならない。期待均衡需要曲線 ED の傾きと同様、定常均衡解の動学的安定性は、$u_0(\bar{p})$ と $g(\bar{p})$ の $\bar{p}$ における点弾力性に依存している。

（3） サービス加入者全体にとっての限界便益

次に、サービス加入者が 1 人増加したときのサービス加入者全体としての便益の変化を考えてみよう。

期待均衡需要曲線 ED の点（$\bar{p}, c$）を通る短期逆需要曲線は、(2)式より、

$$u = u(f, p)|_{f=\bar{p}} = g(\bar{p})u_0(p) \quad \cdots\cdots\cdots(9)$$

となる。今、社会の成員の数を n とすれば、加入者の便益の総和 PW は、

$$PW(\bar{p}) = n\, g(\bar{p}) \int_0^{\bar{p}} u_0(\mu)\, d\mu \quad \cdots\cdots\cdots(10)$$

となる。

ここで、価格 c が僅かに変化したため新たにサービス加入者が 1 人増加し、それと整合的に人々が期待普及率を改訂したとしよう。価格変化前のサービス加入者数を m とすると、サービス加入者が 1 人増加することによるサービス加入者全体にとっての限界便益 MPW は、

$$MPW(\bar{p}) = \frac{d\bar{p}}{dm}\frac{d(PW)}{d\bar{p}} = \frac{1}{n}\, n\left(\frac{d}{d\bar{p}}g(\bar{p}) \int_0^{\bar{p}} u_0(\mu)\, d\mu + g(\bar{p})\, u_0(\bar{p})\right) \quad \cdots\cdots\cdots(11)$$

となる。

いま、各 $\bar{p}$ における期待均衡需要曲線 ED の高さは(2)式より $g(\bar{p})u_0(\bar{p})$ であるから、各 $\bar{p}$ における MPW 曲線の高さと期待均衡需要曲線 ED の高さの差は、

$$MPW(\bar{p}) - ED(\bar{p}) = \frac{d}{d\bar{p}}g(\bar{p}) \int_0^{\bar{p}} u_0(\mu)\, d\mu \quad \cdots\cdots(12)$$

となる。(12)式右辺は、均衡普及率の変化に伴う、すべての消費者の便益の変化の合計を示している。

次に、サービス加入者全体にとっての限界便益 MPW 曲線の傾きを求めると、

$$\frac{d}{d\bar{p}}MPW(\bar{p}) = \frac{d^2}{d\bar{p}^2}g(\bar{p}) \int_0^{\bar{p}} u_0(\mu)\, d\mu + 2\frac{d}{d\bar{p}}g(\bar{p})\, u_0(\bar{p}) + g(\bar{p})\frac{d}{d\bar{p}}u_0(\bar{p}) \quad \cdots(13)$$

となる。

以下では、「プラスの一方向外部性とマイナスのネットワーク外部性を有するサービス（第２類型）」、「一方向外部性はプラスであるがネットワーク外部性の符号が普及率によって変化するサービス（第３類型）」について、期待均衡需要曲線、「サービス加入者全体にとっての限界便益」の性質を整理する

が、$g(f)$、$u_0(p)$については、それぞれ表 1の前提の下で議論を行う。

表 1　$g(f)$、$u_0(p)$の前提

ネットワーク外部性の符号	$g(f)$			$u_0(p)$		
	$g(0)$	$g(1)$	$\frac{d}{df}g(f)$ 並びに η_g の符号	意味	$\frac{d}{dp}u_0(p)$ 並びに η_{u_0} の符号	$u_0(1)$
マイナスの場合	1	0	マイナス	$f=0$ の場合の短期需要曲線	<0	0
プラスからマイナスに変化する場合	0	0	ネットワーク外部性がプラスからマイナスへと変化する境界普及水準を p^*（$g(p^*)=1$）とすると、 $f<p^*$ →プラス $f=p^*$ →0 $f>p^*$ →マイナス	$f=p^*$ の場合の短期需要曲線		

２．　プラスの一方向外部性とマイナスのネットワーク外部性を有するサービスの最適普及水準と税・補助金政策

ここでは、「プラスの一方向外部性とマイナスのネットワーク外部性を有するサービス（第２類型）」について、期待均衡需要曲線、「サービス加入者全体にとっての限界便益」の性質を整理し、市場均衡普及水準と最適普及水準との乖離、最適普及水準達成に必要な税・補助金政策等を議論する。

（１）　期待均衡需要曲線 ED とサービス加入者全体にとっての限界便益曲線 MPW の性質

① 期待均衡需要曲線 ED の性質

ア） 横軸との交差点

$g(1)=0$ であるから、期待均衡需要曲線 ED （(5)式）は、$\bar{p}=1$ で横軸と交差する。

イ） 傾き

期待均衡需要曲線 *ED* の傾き $\frac{dc}{d\bar{p}}$（(6)式）は、$\eta_{u_0}(\bar{p})<0$、$\eta_g(\bar{p})<0$ であるから、マイナスである。

ウ） 動学的安定性

$\eta_g(f)<0$、$\eta_{u_0}(p)<0$ であるから、位相図の傾き（(7)式）はマイナスとなり、期待普及率 f と定常均衡解 $\bar{p}$ との間に乖離があれば、市場普及率は定常均衡解 $\bar{p}$ の回りを回転運動することになる。

次に、定常均衡解 $\bar{p}$ の近傍での動学的安定性であるが、これは、(8)式より、$\eta_{u_0}(\bar{p})$と $\eta_g(\bar{p})$の絶対値の相対的大きさに依存している。

② サービス加入者全体にとっての限界便益曲線 *MPW* の性質

ア） 傾き

(13)式の第２項と第３項はマイナスとなるが、第１項は $\frac{d^2}{d\bar{p}^2}g(\bar{p})$ の値如何によって、プラスにもマイナスにもなりえる。したがって、限界便益曲線 *MPW* の傾きは、プラスとなる可能性もマイナスとなる可能性もある。

但し、$\bar{p}=0$ では、$\frac{d}{d\bar{p}}MPW(\bar{p})|_{\bar{p}=0}=2\frac{d}{d\bar{p}}g(\bar{p})|_{\bar{p}=0}u_0(0)+g(0)\frac{d}{d\bar{p}}u_0(\bar{p})|_{\bar{p}=0}<0$

だから、傾きはマイナスとなる。

イ） 期待均衡需要曲線 *ED* との位置関係

次に、(12)式で示される期待均衡需要曲線 *ED* とサービス加入者全体にとっての限界便益曲線 *MPW* との大小関係については、$\frac{d}{d\bar{p}}g(\bar{p})<0$ であるから、

$\int_0^{\bar{p}} u_0(\mu)\,d\mu=0$（即ち $\bar{p}=0$）の場合を除いて必ずマイナスとなる。

したがって、*MPW* 曲線は、$\bar{p}=0$ で期待均衡需要曲線 *ED* と交わり、$\bar{p}=0$ 以外の点では、必ず期待均衡需要曲線 *ED* の下方に位置することになる。

（２） 最適普及水準達成のための税／補助金政策

図 2は、上述した性質を踏まえて、期待均衡需要曲線 *ED*、サービス加入者全体にとっての限界便益曲線 *MPW*、社会的限界便益曲線 *MSW* の１つのケースを図示したものである。ここでは、一方向外部効果の限界値 *MEX*(*p*) は一定として、社会的限界便益曲線 *MSW* は、サービス加入者全体にとっての限界便益曲線 *MPW* に一方向外部効果 *MEX* を積み上げて描いている。

図 2は、ネットワーク外部性（マイナス）の効果の限界値と一方向性外部性の

限界値の大小関係によって、最適普及水準を達成するためには、課税が必要な場合、補助金が必要な場合の両方が有り得ることを示している。

まず、サービス利用費用について、$c=c1$のケースを考えてみよう。この場合、社会的限界便益曲線 *MSW* と c の交点は *A* であり、普及水準 $p1$が、社会的厚生を最大にする最適普及水準となる。ここでは、ネットワーク外部性の効果の限界値（マイナス）と一方向性外部性の限界値の合計はプラスであり、社会的限界便益曲線 *MSW* は期待均衡需要曲線 *ED* の上方に位置する。この普及水準は、市場に委ねただけでは、達成することはできない。なぜなら、$c=c1$と期待均衡需要曲線との交点は *B* であり、市場に委ねた場合の長期的な普及水準は、$p1$よりも低い普及水準 $p1'$となってしまうからである。したがって、最適普及水準を達成するためには、人為的にサービスの利用費用を下げる必要がある。即ち、*AC* に相当する金額を当該サービスの消費に対して補助する必要がある。

次に、$c=c2$ の水準で考えてみよう。この場合、社会的限界便益曲線 *MSW* と c の交点は *D* であり、普及水準 $p2$ が、社会的厚生を最大にする最適普及水準となる。ここでは、ネットワーク外部性の効果の限界値（マイナス）と一方向性外部性の限界値の合計はマイナスであり、社会的限界便益曲線 *MSW* は期待均衡需要曲線 *ED* の下方に位置する。この普及水準は、市場に委ねただけでは、達成することはできない。なぜなら、$c=c2$ と期待均衡需要曲線との交点は *E* であり、市場に委ねた場合の長期的な普及水準は $p2$ よりも高い普及水準 $p2'$となってしまうからである。したがって、最適水準を達成するためには、人為的にサービスの利用費用を上げる必要がある。即ち、*DF* に相当する税を当該サービスの消費に課税する必要がある。

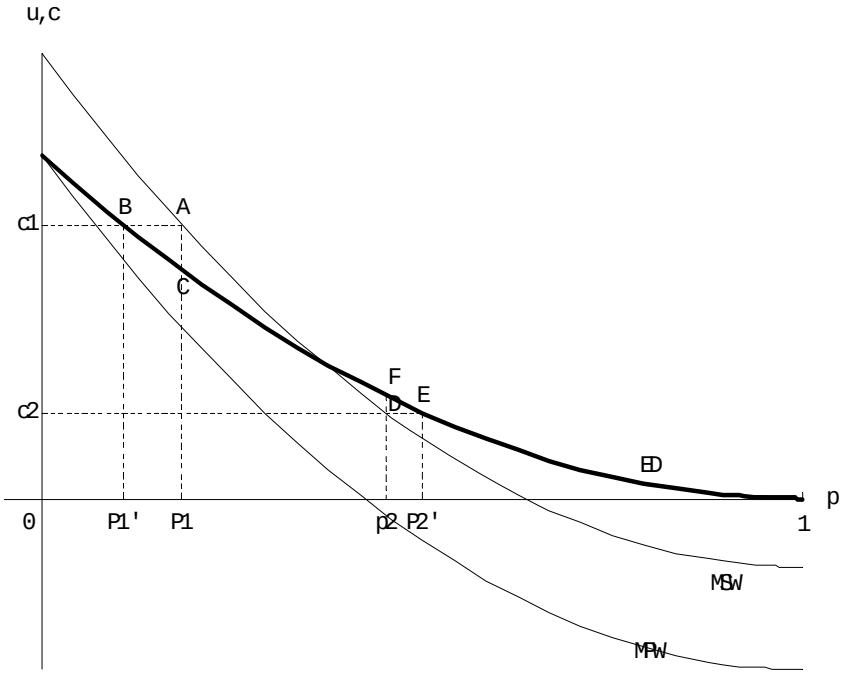


図 2　プラスの一方向外部性とマイナスのネットワーク外部性を有するサービスの最適普及水準と税・補助金政策

３． 一方向外部性はプラスであるがネットワーク外部性の符号が普及率によって変化するサービスの最適普及水準と税・補助金政策

次に、「一方向外部性はプラスであるがネットワーク外部性の符号が普及率によって変化するサービス（第３類型）」について議論する。

この類型は、ネットワーク外部性が、ある普及率を境にしてプラスからマイナスへと変化するという点が特色である。ここではこの境界普及水準を p^* とし、表 1の前提の下で議論を行う。

（1） 期待均衡需要曲線 ED とサービス加入者全体にとっての限界便益曲線 MPW の性質

① 期待均衡需要曲線 ED の性質

ア） 横軸との交差点

$g(0)=g(1)=0$ であるから、期待均衡需要曲線 ED は、$\bar{p}=0$、$\bar{p}=1$ で横軸と交差する。

イ） 傾き

次に、期待均衡需要曲線 ED の傾き $\frac{dc}{d\bar{p}}$ （(6)式）を、$\bar{p}<p^*$、$\bar{p}=p^*$、$\bar{p}>p^*$ の３つの領域に分けてみてみる。

[$\bar{p}<p^*$ の領域]

$\eta_{u_0}(\bar{p})<0$、$\eta_g(\bar{p})>0$ であるから、符号は断定できない。

[$\bar{p}=p^*$ の領域]

$\eta_{u_0}(\bar{p})<0$、$\eta_g(\bar{p})=0$ だから、マイナスとなる。

[$\bar{p}>p^*$ の領域]

$\eta_{u_0}(\bar{p})<0$、$\eta_g(\bar{p})<0$ だから、マイナスとなる。

なお、すべての $\bar{p}$ について、$\frac{d^2}{d\bar{p}^2}u_0(\bar{p})\le 0$、$\frac{d^2}{d\bar{p}^2}g(\bar{p})\le 0$ を仮定すれば、$\bar{p}<p^*$ の領域で

$$\frac{d^2c}{d\bar{p}^2}=g(\bar{p})\frac{d^2}{d\bar{p}^2}u_0(\bar{p})+2\frac{d}{d\bar{p}}g(\bar{p})\frac{d}{d\bar{p}}u_0(\bar{p})+u_0(\bar{p})\frac{d^2}{d\bar{p}^2}g(\bar{p}) \quad \cdots\cdots(15)$$

はマイナスとなり、この領域で、期待均衡需要曲線 ED の傾き $\frac{dc}{d\bar{p}}$ は逓減するこ

とになる。以下では、この仮定に加え、$\frac{dc}{d\bar{p}}$は、プラスからマイナスへと単調に減少していくものと仮定する。

ウ） 動学的安定性

次に、定常均衡解$\bar{p}$近傍の動学的安定性((8)式)を考える。上と同様に、$\bar{p}<p^*$、$\bar{p}=p^*$、$\bar{p}>p^*$の３つの領域に分けて議論する。

[$\bar{p}<p^*$の領域]

$\frac{dc}{d\bar{p}}>0$の領域では、$\eta_{u_0}(\bar{p})>-\eta_g(\bar{p})$だから、(8)式は１よりも大きくなる。したがって、動学的に不安定である。

$\frac{dc}{d\bar{p}}=0$の領域では、$\eta_{u_0}(\bar{p})=-\eta_g(\bar{p})$が成立するから、(8)式は１となる。したがって、動学的に不安定である。

$\frac{dc}{d\bar{p}}<0$の領域では、$\eta_{u_0}(\bar{p})<-\eta_g(\bar{p})$が成立するから、(8)式は１より小さくなる。したがって、動学的に安定である。

[$\bar{p}=p^*$の領域]

$\eta_g(\bar{p})=0$であるから(8)式はゼロとなる。したがって、定常均衡解は動学的安定性を有する。

[$\bar{p}>p^*$の領域]

動学的安定性を有するかどうかは、$\eta_{u_0}(\bar{p})$と$\eta_g(\bar{p})$の絶対値の相対的大きさに依存しており、断定できない。

② サービス加入者全体にとっての限界便益曲線MPWの性質

ア） 傾き

(13)式で示されるサービス加入者全体にとっての限界便益曲線MPWの傾きを、$\bar{p}<p^*$、$\bar{p}=p^*$、$\bar{p}>p^*$の３つの領域に分けて議論する。

[$\bar{p}<p^*$の領域]

(13)式の第１項、第３項は定義によりマイナスであるが、第２項はプラスである。したがって、限界便益曲線MPWの傾きは、プラスにもマイナスにもなりえる。

但し、$\bar{p}=0$では、第１項、第３項は定義によりゼロであり、第２項はプラスであるから、$\bar{p}=0$では傾きはプラスとなる。

[$\bar{p} = p^*$の領域]

(13)式の第１項、第３項は定義によりマイナスであり、第２項はゼロであるから、限界便益曲線 *MPW* の傾きはマイナスとなる。

[$\bar{p} > p^*$の領域]

(13)式の第１項、第３項は定義によりマイナスであり、第２項はマイナスであるから、限界便益曲線 *MPW* の傾きはマイナスとなる。

イ） 期待均衡需要曲線 *ED* との位置関係

次に、(12)式で示される期待均衡需要曲線 *ED* とサービス加入者全体にとっての限界便益曲線 *MPW* との大小関係を、上と同様に、$\bar{p} < p^*$、$\bar{p} = p^*$、$\bar{p} > p^*$の３つの領域に分けて記述する。

[$\bar{p} < p^*$の領域]

$\frac{d}{d\bar{p}} g(\bar{p}) > 0$ だから、$\bar{p}=0$ を除き(12)式はプラスとなる。サービス加入者全体にとっての限界便益曲線 *MPW* は、$\bar{p}=0$ で期待均衡需要曲線 *ED* と交差し、それ以外の点では、期待均衡需要曲線 *ED* の上方に位置する。

[$\bar{p} = p^*$の領域]

$\frac{d}{d\bar{p}} g(\bar{p}) = 0$ だから、(12)式はゼロとなる。サービス加入者全体にとっての限界便益曲線 *MPW* は、期待均衡需要曲線 *ED* と交差する。

[$\bar{p} > p^*$の領域]

$\frac{d}{d\bar{p}} g(\bar{p}) < 0$ だから、(12)式はマイナスとなる。サービス加入者全体にとっての限界便益曲線 *MPW* は、期待均衡需要曲線 *ED* の下方に位置する。

（２） 最適普及水準達成のための税/補助金政策

図 3は、以上の性質を踏まえて、期待均衡需要曲線 *ED*、サービス加入者全体にとっての限界便益曲線 *MPW*、社会的限界便益曲線 *MSW* の１つのケースを図示したものである。「プラスの一方向外部性とマイナスのネットワーク外部性を有するサービス」と同様に、一方向外部効果の限界値 $MEX(p)$ は一定として、社会的限界便益曲線 *MSW* は、サービス加入者全体にとっての限界便益曲線 *MPW* に一方向外部効果 *MEX* を積み上げて描いている。

まず、サービス利用費用について、$c = c1$のケースを考えてみよう。この場合、社会的限界便益曲線 *MSW* と c は２点で交差するが、社会的厚生を最大にする最適普及水準は *A* 点に対応する普及水準 $p1$ である[iii]。ここでは、ネットワーク外

部性の効果の限界値と一方向性外部性の限界値の合計はプラスであり、社会的限界便益曲線 *MSW* は期待均衡需要曲線 *ED* の上方に位置する。最適普及水準 *p*1 は、市場に委ねただけでは達成することはできない。なぜなら、*c* = *c*1 と期待均衡需要曲線 *ED* とは交差せず、市場に委ねた場合の長期的な普及水準はゼロとなるからである。最適普及水準を達成するためには、人為的にサービスの利用費用を下げる必要がある。即ち、*AB* に相当する金額を当該サービスの消費に対して補助する必要がある。

次に、*c* = *c*2 の水準で考えてみよう。この場合は、社会的限界便益曲線 *MSW* と *c* = *c*2 が交差する *C* 点に対応する普及水準 *p*2 が最適普及水準となる。ここでは、ネットワーク外部性の効果の限界値（マイナス）と一方向性外部性の限界値の合計はマイナスであり、社会的限界便益曲線 *MSW* は期待均衡需要曲線 *ED* の下方に位置する。この場合も、市場に委ねただけでは、この普及水準を達成することはできない。なぜなら、*c* = *c*2 と期待均衡需要曲線 *ED* とは *E* で交差し、市場に委ねた場合の長期的な普及水準は、最適普及水準を上回るからである。したがって、最適普及水準を達成するためには、人為的にサービスの利用費用を上げる必要がある。即ち、*CD* に相当する金額を当該サービスの消費に対して課税する必要がある。

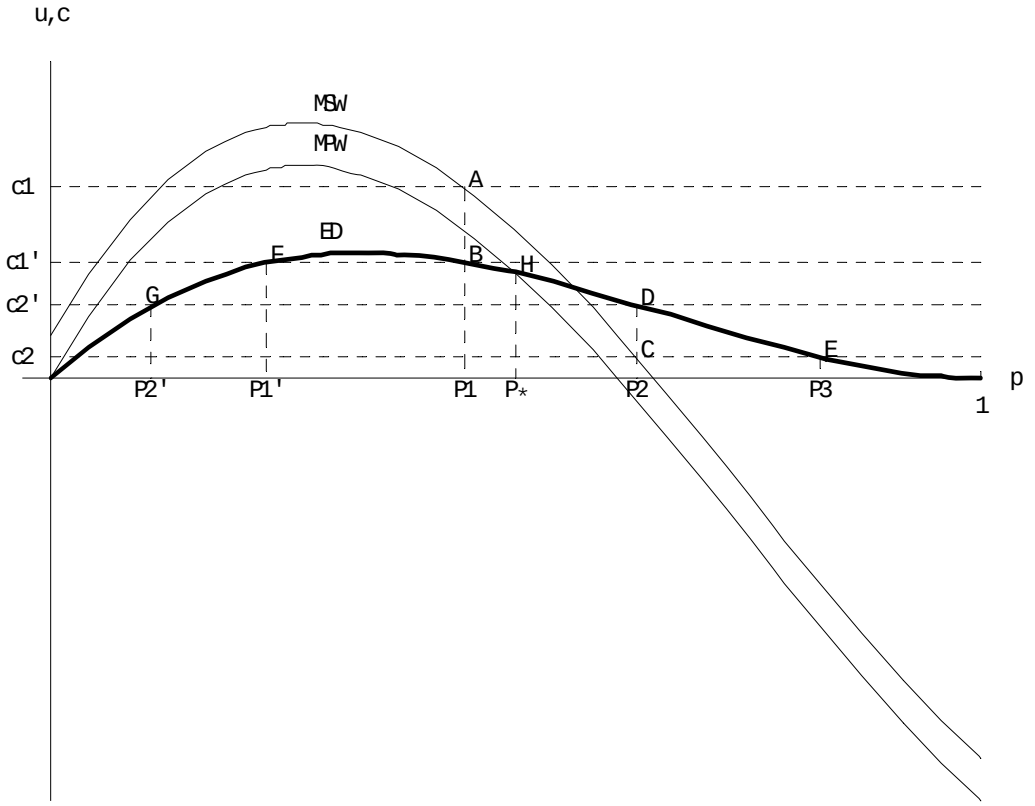


図 3　プラスの一方向外部性とプラス／マイナスのネットワーク外部性を有するサービスの最適普及水準と税・補助金政策

（3） 期待普及率が最適普及水準の近傍にない場合の動学的安定性

$c=c1$のケースは、$p1<p^*$で$\frac{dc}{d\bar{p}}<0$ であるから、最適普及水準での位相図の傾きは１より小さく、初期の期待普及率fが最適普及水準$p1$の近傍にあるかぎり動学的安定性を有する。

一方、$c=c2$のケースは、$p2>p^*$であるから、最適普及水準$p2$が動学的安定性を有するかどうかは、$\eta_{u_0}(\bar{p})$と$\eta_g(\bar{p})$の絶対値の相対的大きさに依存している。

ここでは、$c=c1$のケースについて、初期の期待普及率fが最適普及水準$p1$の近傍にない場合に、市場普及水準が最適普及水準$p1$に収束していくかどうかをみてみよう。

図 4は、$c=c1$のケースについて、(7)式で示した位相図を描いたものである。点線で示される 45°線と位相図の交点であるB'点は 図 3のB点、そしてF'点は 図 3のF点に対応している。位相図の傾きは、定義により、$\bar{p}<p^*$の領域ではプラス、$\bar{p}=p^*$の領域ではゼロ、$\bar{p}>p^*$の領域ではマイナスとなる。また、数式展開は割愛するが、上述した仮定の通り、すべてのp、fにおいて$\frac{d^2}{dp}u_0(p)\le 0$、$\frac{d^2}{df}g(f)\le 0$ が成立する場合、$\frac{d^2p_t}{dp_{t-1}^{\ 2}}$ ((7)式の導関数）はマイナスとなり、位相図の傾きは単調に減少していく。

以下では、当初の期待普及率fの水準別に、市場普及水準が最適普及水準$p1$に収束していくかどうかをみてみよう。

① $f<p1'$の場合

F'点においては、$\frac{dc}{d\bar{p}}>0$ であるから$\eta_{u_0}(\bar{p})>-\eta_g(\bar{p})$となり、(8)式で示される位相図の傾きは１より大きい。位相図の傾きは逓減しているから、$f<p1'$の領域では位相図は常に 45°線の下方に位置する。したがって、実現される普及率は必ず期待普及率fより小さくなり、市場普及率は、最適普及水準$p1$には近づかない。

② $p1'<f<p1$の場合

E'点における位相図の傾きは１より大きい。一方、B'点においては、$\eta_{u_0}(\bar{p})<-\eta_g(\bar{p})$が成立するから、位相図の傾きは１より小さい。仮定により、位相図の傾きは単調減少しているから、E'点とB'点の間では、位相図は必ず 45°線の上方に位置する。したがって、実現される普及率は必ず期待普及率fより大きく、市場普及率は$p1$に接近していく。

③　$p1 < f \leq p^{*}$ の場合

位相図の傾きは、B' 点では 1 より小さく、H' 点ではゼロである。位相図の傾きは単調に減少しているから、この領域では、位相図は常に 45°線の下方に位置する。したがって、実現される普及率は必ず期待普及率 f より小さくなり、市場普及率は最適普及水準 $p1$ に接近していく。

④　$p^{*} < f$ の場合

この領域では、位相図の傾きはマイナスとなる。いま、この領域において、$p1'$ を市場普及率として与えるような期待普及率 f の水準を考え、それを p^{**} とする。当初の期待普及率 f が $f < p^{**}$ の領域に存在すれば、市場普及率は、一旦、$p1'$ よりも大きく p^{*} よりも小さい値となるが、その後は $p1' < f < p1$ の場合、$p1 < f \leq p^{*}$ の場合で示したように、市場普及率は最適普及水準 $p1$ に収束していく。しかし、$f > p^{**}$ ならば、市場普及率は一旦 $p1'$ を下回る。そしてその後は、$f < p1'$ の場合に示したように、市場普及率は、最適普及水準 $p1$ には近づかない。

以上から、当初の期待普及率 f が $p1' < f < p^{**}$ の条件を満たすかぎり、AB に相当する金額を補助すれば、普及水準は最適普及水準 $p1$ に自動的に接近していくことが分かる。

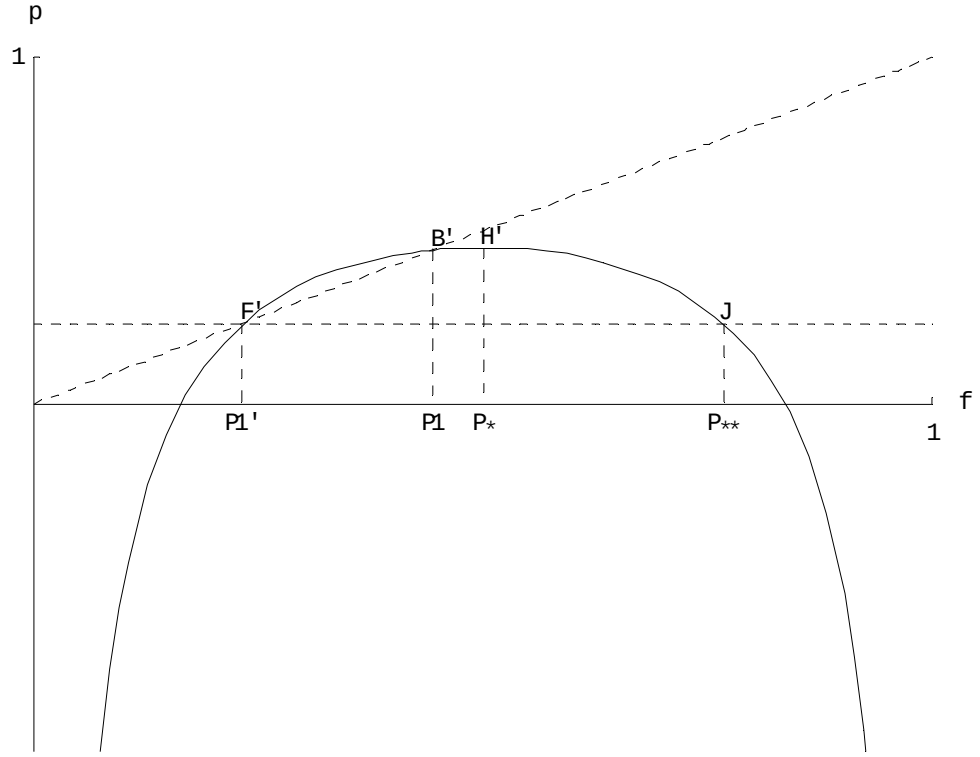


図 4　プラスの一方向外部性とプラス／マイナスのネットワーク外部性を有するサービスの位相図

IV　VICS の最適普及水準と税・補助金政策

以上、「プラスの一方向外部性とマイナスのネットワーク外部性を有するサービス」、「一方向外部性はプラスであるがネットワーク外部性の符号が普及率によって変化するサービス」の２類型について、需要曲線の性質、市場均衡普及水準と最適普及水準との乖離、最適普及水準達成に必要な税・補助金政策等を理論的に整理した。

以下では、分析対象を、「プラスの一方向外部性とマイナスのネットワーク外部性を有するサービス」である VICS に絞り、その便益を詳細に分類するとともに、シミュレーションを行い、社会的限界便益や最適普及水準を計測する。

まず、その準備作業として、ドライバーに対する交通情報、経路情報の提供に関する先行研究をサーベイし、本稿で行うシミュレーションの独自性、着眼点を明確にする。

１．先行研究サーベイと本分析の独自性

ドライバーに対する交通情報、経路情報の提供が、情報利用者、非利用者の双方にどの程度の旅行時間の短縮をもたらすのかという点については、諸外国の研究者によって数多くのコンピュータシミュレーションが行われてきた。多くの研究は、仮想の OD ペアと道路網を設定し、情報利用者、非利用者の双方のルート選択行動を定式化した上で、混雑度、情報利用の普及水準、情報の質等が旅行時間に与える影響を計測するというものである。

これらの研究のうち、特に普及水準の旅行時間に及ぼす影響に着目した研究としては、Ben-Akiva et al.(1991)、Emmerink et al.(1995a,b)、Koutsopoulos and Lotan(1990)、Mahmassani and Jayakrishnan(1991)、Yang (1999)等がある。これらは、様々な普及水準を外生的に設定して、情報利用者、非利用者の双方の旅行時間に与える影響を計測しているが、多くは、普及水準が旅行時間の短縮率に大きな影響を与えると報告している。

しかし、以上の研究は、普及率を外生的に設定したものである。交通情報に対する需要曲線を定式化したうえで、モデルの内生変数として普及率を求めようとする研究は、Emmerink et al.(1994)で最初にそのフレームワークが議論され、Yang (1998, 2001,2004)、Lo and Szeto (2002)でモデル化が行われている。Yang (1998)では、サービス利用者は交通情報に基づいて最短ルートを決定論的に走行する。一方、非利用者は旅行ルートをロジット選択に基づき確率論的に選択する。利用者の便益は利用者と非利用者との間の旅行時間の差であり、交通情報サービスに対する需要曲線は、旅行時間差を説明変数とするロジットモデルで定式化されている。Yang and Meng (2001)は、このモデルを動学化して普及率の時間変化を分析したものであり Yin and Yang (2003)は、サービス利用

者が、情報の質を加味してルートの選択を行う場合に、分析を拡張したものである。但し、この一連の研究で議論されている普及率は市場普及率（本稿でいうところの期待均衡需要曲線と供給曲線の交点）であって、規範的な意味での普及水準ではない。

一方、規範的な観点から普及水準をモデルで内生的に解こうと試みた研究には、Lo and Szeto (2002)がある。Lo and Szeto (2002)は、交通情報サービスについて、ユーザー、サービス業者、交通管理者という３つの主体にとっての評価変数を定式化し、サービスが維持可能な「情報の質」と「サービス提供価格」の組み合わせを算出している。具体的には、まず、ユーザーの評価変数は消費者余剰となっている。情報を利用した場合のドライバーの便益は、ドライバーが情報の質を考慮して旅行ルートを多項ロジットモデルで選択し、その結果削減される旅行時間に時間価値を乗じたものとして定式化されている。そして、ドライバーがサービスに加入するかどうかは、価格と削減旅行時間価値等を変数とした２項ロジットモデルで決定される。次に、サービス提供業者からみた評価変数は利潤であるが、サービス提供費用については、情報の質を高めるに応じて高くなる構造が組み込まれている。最後に、政府の評価変数はドライバー全体の旅行時間の削減率である。この論文では、以上の定式化のもとで、３つのノードと２つの OD ペアからなる香港の道路ネットワークを用いて、いずれの評価変数もマイナスにならない情報の質とサービス価格の組み合わせを導出するとともに、１）ユーザーの評価変数を最大化する、２）サービス業者の評価変数を最大化する、そして、３）交通管理者の評価変数を最大化する、という３つのケースについて、対応する情報の質と価格の組み合わせを算出している。しかし、この論文は、どういった情報の質と価格の組み合わせが社会的に最適なのかという点までは議論が及んでいない。

以上のように、普及率を論じた大部分の先行研究の関心事は、サービス非利用者を含めた全体としての旅行時間の最小化或いは市場普及率にあり、社会的限界便益と社会的限界コストというフレームワークの中で最適普及水準を議論する研究はこれまで全く行われていない。本稿は、極めて強い仮定の下での１つの実験に過ぎないが、社会的限界便益と社会的限界コストの枠組みの中で VICS の最適普及水準の計測を試みる。

２． VICS の社会的便益

ここでは、シミュレーションの準備作業として、VICS によって発生する便益を詳細に分類する。

（1） 便益の分類

まず、表 2は、VICSによって発生する社会全体としての便益を、大きくドライバーに帰属する便益と環境改善便益の２つに分類し、それぞれの便益の内訳とその帰属先、内容を示したものである。

これによれば、第１のドライバーに帰属する便益としては、旅行時間短縮便益や走行経費削減便益が挙げられる。上述した通り、この便益は、VICS 端末装着車、非装着車双方に発生する。そして前者の便益はネットワーク外部性を有し、後者の便益は一方向外部性として発生する。なお、ドライバーに帰属する便益としては、これら２つの便益以外に、カーナビゲーション機能の便益がある。これは、VICS 端末がカーナビゲーション機能を備えているからである。この便益は、当然のことながら VICS 端末装着車のみに帰属する。

次に、環境改善便益であるが、NOX（窒素酸化物）、PM（粒子状物質）等の大気汚染物質削減便益と炭素排出削減便益の２種類が考えられる。前者の便益は、大都市沿道住民の健康被害の減少、酸性雨の世界的減少をその内容とする。一方、後者の便益は、人類全体に対する地球温暖化抑制をその内容とする。

表 2　VICS の便益

ドライバーに帰属する便益		便益の帰属	
		VICS端末装着車	VICS端末非装着車
便益の種類	旅行時間短縮便益	混雑回避による旅行時間短縮	混雑度減少による旅行時間短縮
	走行経費削減便益	混雑回避によって走行スピードが上昇するため走行燃費が低下	混雑度減少によって走行スピードが上昇するため走行燃費が低下
	その他	カーナビゲーション機能	－

環境改善便益		便益の帰属	
		都市部の沿道住民	人類全体
便益の種類	大気汚染物質削減便益（NOX、SPM等）	有害物質の削減による健康被害の減少	酸性雨の減少
	炭素排出削減便益	－	地球温暖化抑制

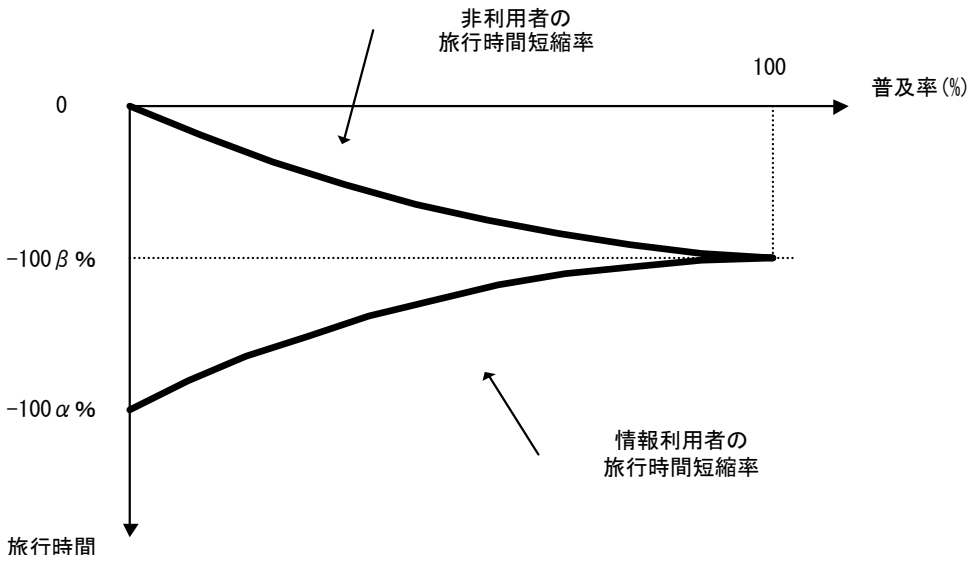
（2） 旅行時間短縮便益

VICS によって発生する社会全体としての便益は以上の通りであるが、ここでは、旅行時間短縮便益に絞って、その詳細な内訳を議論する。これを議論する上で、最も重要となるのは、VICS が、端末装着車と非装着車の旅行時間をどの程度短縮するかという点である。

① 普及率と旅行時間短縮率との関係

上述したように、交通情報サービスの普及水準の旅行時間に及ぼす影響については、幾つかの先行研究があるが、ここでは、ここでは、Emmerink et al.(1995)のシミュレーション結果を参考にしながら議論を進める。

Emmerink et al.(1995)は、ドライバーの旅行時間に関する情報として、1)自分が走行した経験のあるルートに関する自己の経験情報、2)自分が走行しなかったルートに関するテレビ、ラジオ等からの事後情報、3)走行中のリアルタイムの情報、の３つを想定している。このうち、ドライバーが 1)と 3)の情報を有するケースのルート選択については、まず、出発時は自己の経験した旅行時間に関する情報に基づいてルートを選択する。そして、新しいリンクの走行前に与えられるリアルタイム情報に基づいて、現在のルートと他のルートの所要時間を比較し、その差が一定水準以上であればルートを変更し、そうでない場合は現在選択しているルートをそのまま走行するという前提を置いている。そして、この前提の下で、情報利用者と非利用者双方の旅行時間がどの程度短縮されるのかを、混雑の程度と普及率との組み合わせでシミュレートしている。そして、1)混雑度が高いほど、情報利用者の旅行時間短縮は大きい、2)同じ混雑率なら普及率が高いほど、情報利用者の旅行時間短縮は小さい。3)普及率が 75%の段階で情報利用者と非利用者の旅行時間の差は小さくなり、その差は、普及率 100%でゼロとなる、等の結果を得ている。そして、Emmerink et al.(1994)は、普及率と旅行時間短縮率との関係を 図 5のようなイメージ図で示している。



Emmerink et al.(1994), P370, Figure 2を改訂して表示

図 5　交通情報サービスの普及水準と旅行時間短縮率

② 旅行時間短縮便益の分類

VICSについても、普及率と旅行時間短縮率との関係が、図 5のような形状で示されるとすると、VICSによって社会全体に発生する旅行時間短縮便益の大きさは、どのように分類できるのか。これを図示したものが図 6である。

まず、図 6の太線で示される２つのカーブは、普及率ゼロの水準と比較したVICS端末装着車 1 台の旅行時間短縮便益と、VICS端末非装着車 1 台の旅行時間短縮便益を示している。議論を単純化するため、すべてのドライバーの旅行時間と時間価値は等しいとしている。普及率の上昇に応じて装着車の旅行時間短縮率は減少するから、VICS端末装着車１台の旅行時間短縮便益は、徐々に減少していく（マイナスのネットワーク外部性）。一方、普及率の上昇に応じて非装着車の旅行時間短縮率は上昇するから、VICS端末非装着車１台の旅行時間短縮便益は、徐々に増加していく（プラスの一方向外部性）。

そして、社会に発生する旅行時間短縮便益は、VICS端末装着車に帰属する２つの便益（図 6の「①市場で評価される装着車の便益」、「②市場で評価されない装着車の便益」）と、VICS端末非装着車に帰属する便益（図 6「③非装着車の便益」）という３つの便益に分類することができる。

まず、装着車にとっての便益であるが、この合計値は、普及率ゼロの水準と比較した短縮旅行時間（価値）に普及率を乗じたものに等しいが、この便益は、市場評価の対象となる便益と対象とならない便益の２つから構成される。第１の、「①市場で評価される装着車の便益」とは、普及率の上昇に伴って徐々に減少する装着車と非装着車との旅行時間差（価値）と普及率との積で示される。何故なら、VICS の市場価値は、非装着車と比べた短縮旅行時間で評価されるの

であって、普及率ゼロ水準との旅行時間差で評価されるわけではないからである。この便益は普及率のどこかの水準で最大となり、普及率が 100%の段階でゼロとなる。そして、第２の、「②市場で評価されない装着車の便益」とは、普及率ゼロの水準と比較した非装着車の短縮旅行時間（価値）と普及率との積で示される。何故なら、装着車は、①の便益に加え、非装着車と同じ旅行時間の短縮を享受しているからである。この便益は普及率が上昇するにつれて単調に増加していく。

次に、「③非装着車の便益」であるが、これは、普及率ゼロの水準と比較した非装着車の短縮旅行時間（価値）に（１-普及率）乗じたものに等しい。普及率が上昇するにつれて短縮旅行時間は増加するが、逆に（１-普及率）は減少するから、この便益は普及率のどこかの水準で最大となり、普及率が 100%の段階でゼロとなる。

このように、VICS によって社会全体に発生する旅行時間短縮便益は３つの形態に分類することができる。したがって、VICS の社会的限界便益 MSW は、（市場で評価される）装着者全体の便益の限界値 MPW と、限界外部効果 MEX（非装着車全体の便益の限界値）だけではなく、市場評価されない装着車全体の便益の限界値 MPW' も考慮しなくてはならず、(14)式は、

$$MSW(\bar{p}) = MPW(\bar{p}) + MPW'(\bar{p}) + MEX(\bar{p}) \quad \cdots\cdots (14)'$$

と改訂しなければならない。なお、これは、走行経費削減便益についても同様である。

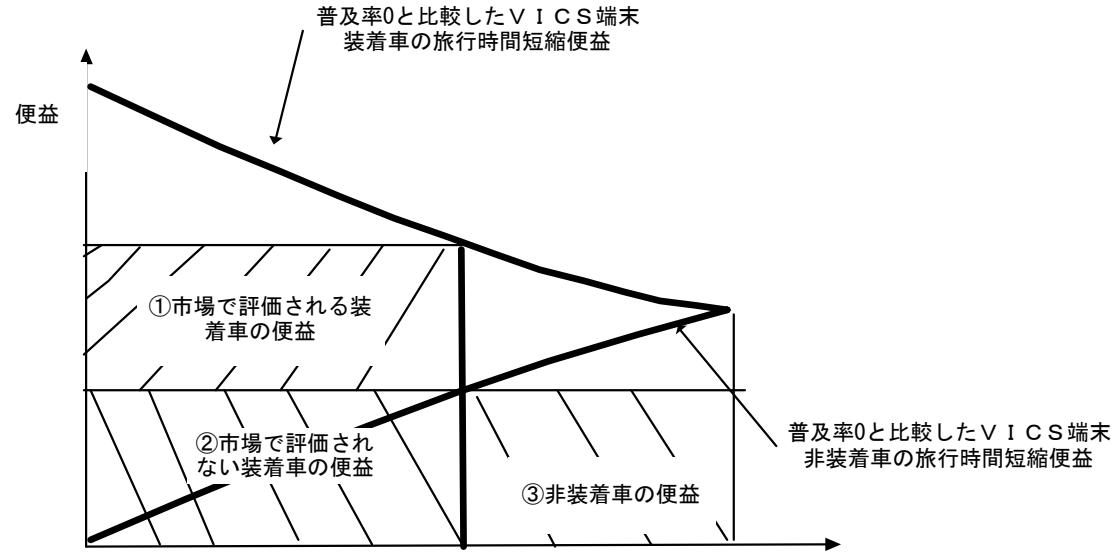


図 6　VICS の普及水準と旅行時間短縮便益

３． シミュレーションモデル

以下では、VICS の社会的便益や最適普及水準、最適普及水準を達成するための税/補助金額等をシミュレートする。まず、シミュレーションの大枠を述べる。

（1） シミュレーションの枠組み

① 計測対象便益

ドライバーに帰属する便益として、表 2の便益の内、VICS端末装着車、非装着車双方に発生する旅行時間短縮便益と走行経費削減便益を計測対象とする。そして、旅行時間短縮便益と走行経費削減便益は、装着車が一般道路の混雑地域（「DID」と「その他市街部」）[iv]を走行する場合にのみ発生するものとし、それ以外の地域[v]の走行では発生しないものと仮定する。VICS端末装着車に帰属するカーナビゲーション機能の便益は計測しない。

一方、環境改善便益としては、炭素排出削減便益のみを計測し、大気汚染物質削減便益は計測しない。

なお、極めて非現実的な仮定ではあるが、VICS 端末装着による旅行時間の短縮は、すべて走行速度の改善によってもたらされるものと仮定し、走行経費削減便益と炭素排出削減便益を推計する。

② 計測対象地域

本シミュレーションでは、以下の仮定が成立する架空の地域を想定する。

- VICSの普及水準と旅行時間短縮との関係は、地域全体で、図 5の形状を示す。但し、旅行時間の短縮率（図 5のα、β）については数値を特定化せず、様々なケースを設定してシミュレーションを行う[vi]。
- 任意の普及水準において、VICS 装着車の旅行時間短縮率、VICS 非装着車の旅行時間短縮率は、総ての車両について等しい。

③ 車種分類

車両を、乗用車、軽貨物車、小型貨物車、普通貨物車の 4 車種に分類し、それぞれの車種毎に時間単価を設定する。

④ 車種構成、走行距離分布等

車種別台数構成、車種別の走行距離分布、沿道環境別 [vii]の走行距離や走行速度は、関東運輸局地域（茨城、栃木、群馬、埼玉県、千葉県、東京都、神奈川

県、山梨）の数値を用いた。

⑤　VICS 普及による交通量の変化

VICS は、走行の一般化費用を低下させるから、VICS は交通量を増加させると考えるのが妥当である。しかしながら、ここではモデルを単純化するため、VICS は交通量を変化させないものとして（即ち、一般化費用に対する弾力性がゼロの交通需要曲線を仮定して）シミュレーションを行う。

（2）　シミュレーションモデルの詳細

シミュレーションモデル並びに各種パラメータの詳細は次の通りである。

①　旅行時間/走行距離/走行速度の変化

VICS の普及による装着車、非装着車双方の旅行時間/走行距離/走行速度の変化は、VICS 普及率の関数として、次の通り定式化した。

まず、VICS 端末の普及率を p、普及率 p が 0 の場合の初期走行速度を $\bar{v}_0$ とおく。p=0 の場合と比較した VICS 端末装着車の旅行時間変化率を $rt_{with}(p)$、走行距離の変化率を $rx_{with}(p)$ とすれば、装着車の走行速度の変化率 $rv_{with}(p)$ は、

$$rv_{with}(p)=\frac{rx_{with}(p)-rt_{with}(p)}{1+rt_{with}(p)} \quad \cdots\cdots(15)$$

走行速度 $v_{with}(p)$ は、

$$v_{with}(p)=v_0(1+rv_{with}(p)) \quad \cdots\cdots(16)$$

となる。

一方、VICS 非装着車の旅行時間変化率を $rt_{without}(p)$、走行距離の変化率を $rx_{without}(p)$ とすれば、非装着車の走行速度の変化率 $rv_{without}(p)$ は 、

$$rv_{without}(p)=\frac{rx_{without}(p)-rt_{without}(p)}{1+rt_{without}(p)} \quad \cdots\cdots(17)$$

走行速度 $v_{without}(p)$ は、

$$v_{without}(p)=v_0 \ (1+rv_{without}(p)) \quad \cdots\cdots(18)$$

となる。

計算にあたっては、初期走行速度 $\bar{v}_0$、旅行時間の変化率 $rt_{with}(p)$、$rt_{without}(p)$、そして、走行距離の変化率 $rx_{with}(p)$、$rx_{without}(p)$ を、次のように設定した。

ア）　初期の走行速度 $\bar{v}_0$

初期の走行速度 $\bar{v}_0$ は、関東臨海ブロック並びに関東内陸ブロックにおける一般道路の「DID」と「その他市街部」の混雑時平均旅行速度を加重平均し、$\bar{v}_0$=20.54 ㎞/h とした[viii]。

イ） 旅行時間の短縮率

Emmerink et al.(1995a)の実証分析結果を参考に、装着車の旅行時間短縮率$rt_{with}(p)$は、

$$rt_{with}(p) = -\exp((\ln(\beta)-\ln(\alpha))p+\ln\alpha) \quad : \alpha > \beta \ldots\ldots(19)$$

と定式化した。この定式化の下では、旅行時間は、普及率 0 で 100α%減少し、普及率 1 で 100β%減少する。

一方、非装着車の旅行時間変化率$rt_{without}(p)$は、同じく、Emmerink et al.(1995a)の実証分析結果を参考に、

$$rt_{without}(p) = -\ln((\exp(\beta)-1)p+1)\ldots\ldots(20)$$

と定式化した。この定式化の下では、旅行時間は、普及率 0 では減少しないが、普及率 1 で 100β%減少（装着車と同じ減少率）することになる。

ウ） 走行距離の変化率

上述したように、VICS 端末装着車、非装着車共に、走行距離は全く変化しないものとし、

$$rx_{with}(p) = rx_{without}(p) = 0 \ldots\ldots(21)$$

とした。

② 装着車にとっての VICS の私的便益

普及水準 p における、車種 $i \in \{c, l, s, b\}$（c ：乗用車, l ：軽貨物車, s ：小型貨物車, b ：普通貨物車）の、VICS端末装着の私的便益（図 6の「①市場で評価される装着車の便益」）を、旅行時間短縮便益、走行経費削減便益に分けて次のように算出した。

ア） 旅行時間短縮便益

各車種の月間走行距離を x_i 、時間価値を $\overline{w}_i$ とすると、各車種の VICS 端末装着による旅行時間短縮便益 $bentsave_{i,with}$ は、装着車と非装着車の旅行時間の差から、

$$bentsave_{i,with}(p, x_i) = \overline{w}_i \frac{x_i}{\overline{v}_0}(rt_{without}(p) - rt_{with}(p))\ldots\ldots(22)$$

となる。ここでは、時間価値 $\overline{w}_i$ は、車種が同一であればすべての車に共通と仮定し、国土交通省の費用便益マニュアルより、表 3の通り置いた。

表 3　車種別時間価値

車種	時間価値 $\overline{w}_i$ （円）
乗用車 $i=c$	3,772
軽貨物車 $i=l$	3,409
小型貨物車 $i=s$	
普通貨物車 $i=b$	5,246

（H15 年価格）

資料）国土交通省道路局都市・地域整備局『費用便益分析マニュアル案』平成 15 年８月

イ） 走行経費削減便益

走行経費削減便益 $benensave_{i,with}$ は、走行速度から走行燃費を求め、装着車と非装着車との燃料消費量の差から求めた。

まず、走行燃費 $er_i(v)$ (km/l)は、乗用車、軽貨物車については 10-15 モード燃費 e_i との関係から、また、貨物車については、走行重量（車両重量＋積載重量）z_i との関係から、表 4の通り定式化した。

表 4　車種別の走行燃費式

車種	$er_i(v)$
乗用車　$i=c$	$54.87 e_c / ((356.9/v - 1.706 v + 0.0128 v^2 + 105.2))$ [ix] e_c:$13.75\ km/l$ [x]……(23)
軽貨物車　$i=l$	$54.87 e_l / ((356.9/v - 1.706 v + 0.0128 v^2 + 105.2))$ e_l:$21.5\ km/l$ [xi]……(24)
小型、普通貨物車$i=s\ b$	$2{,}627/((669.0/v + 114.3) + (0.0120 v^2 - 1.742 v + 91.09) z_i)$ [xii] ……(25) 走行重量 z_i=車両重量＋積載重量（最大積載量*輸送効率） a)最大積載量[xiii]：普通貨物車$6.0t$、小型貨物車$1t$ b)車両重量[xiv]：普通貨物車$3.5t$、小型貨物車$1.5t$ c)輸送効率（輸送トンキロ/能力トンキロ）[xv]：普通貨物車：0.42、小型貨物車：0.11

そして、VICS 装着によるエネルギー消費削減量 $ensave_{i,with}$ は、

$$ensave_{i,with}(p, x_i) = x_i \left(\frac{1}{er_{i,without}(p)} - \frac{1}{er_{i,with}(p)}\right) \cdots\cdots (26)$$

$$er_{i,with}(p) = er_i(v_{with}(p))、\ er_{i,without}(p) = er_i(v_{without}(p)) \cdots\cdots (27)$$

として求めた。

走行経費削減便益 $benensave_{i,with}$ はエネルギー消費削減量 $ensave_{i,with}$ にエネルギー価格を乗じたものであるから、

$$benensave_{i,with}(p, x_i) = \bar{p}_i^e * ensave_{i,with}(p, x_i) \cdots\cdots (28)$$

$\bar{p}_c^e$、$\bar{p}_l^e$ ：　ガソリン価格 100 円

$\bar{p}_s^e$、$\bar{p}_b^e$ ：　軽油価格 78 円

となる。

ウ） 合計便益

以上から、普及水準 p における各車種の VICS 端末装着の私的便益 $ben_{i,with}$ は

$$ben_{i,with}(p, x_i) = bentsave_{i,with}(p, x_i) + benensave_{i,with}(p, x_i)$$

$$= x_i \left(\frac{\bar{w}_i}{\bar{v}_o}(rt_{without}(p) - rt_{with}(p)) + \bar{p}_i^e \left(\frac{1}{er_{i,without}(p)} - \frac{1}{er_{i,with}(p)}\right)\right) \cdots\cdots (29)$$

となる。

③　走行距離の分布

上述した通り、VICS 装着による旅行時間の短縮は、一般道路の「DID」と「その他市街部」を走行する時にのみに発生し、一般道路の「平地部」と「山地部」並びに高速道路での走行時には発生しないものとした。そして、各車種の「DID」と「その他市街部」での月間走行距離 x_i の分布は、車種に応じて、次のような対数正規分布に従うものとした。

$$g_i(x_i)=\frac{1}{\sigma_{x_i} x_i \sqrt{2\pi}}\exp[-\frac{(\ln x_i-\mu_{x_i})^2}{2\sigma_{x_i}^{\ 2}}]\cdots\cdots(30)$$

$\mu_{x_i}=\eta_{x_i}+\ln\kappa_i+\ln\lambda_i$

η_{x_i} ：車種 i の月間走行距離の全国平均値と中央値[xvi]から算出

κ_i ：関東臨海ブロックと関東内陸ブロックにおける車種 i の年間走行距離の全国平均に対する比率[xvii]

λ_i ：関東臨海ブロックと関東内陸ブロックにおける車種 i の走行距離全体に占める一般道路「DID」＋「その他市街部」走行距離の比率[xviii]

σ_{x_i} ：車種 i の月間走行距離の平均値と中央値から算出

各パラメータの数値は、表 5の通りである。

表 5　走行距離分布のパラメータ

車種	η_{x_i}	κ_i	λ_i	μ_{x_i}	σ_{x_i}
乗用車 $i=c$	5.659	0.906	0.500	4.867	0.909
軽貨物車 $i=l$	6.166	0.956	0.498	5.424	1.233
小型貨物車 $i=s$	6.729	0.920	0.498	5.949	1.023
普通貨物車 $i=b$	8.183	0.929	0.496	7.048	0.339

④　期待均衡需要曲線 ED

次に期待均衡需要曲線 ED を求めよう。いま、VICS の普及率 p の下での、各車種の限界的な VICS 端末装着車の走行距離を $x^*=(x_c^*, x_l^*, x_s^*, x_b^*)$ とすると、期待均衡需要曲線 ED 上では、

$$F^l(p, x_c^*, x_l^*)=ben_{c,with}(p, x_c^*)-ben_{l,with}(p, x_l^*)=0\ldots\ldots(31)$$

$$F^s(p, x_c^*, x_s^*)=ben_{c,with}(p, x_c^*)-ben_{s,with}(p, x_s^*)=0\ldots\ldots(32)$$

$$F^b(p, x_c^*, x_b^*)=ben_{c,with}(p, x_c^*)-ben_{b,with}(p, x_b^*)=0\ldots\ldots(33)$$

$$F(p, x^*)=\frac{1}{\bar{n}}\sum_i \bar{n}_i\int_{x_i^*}^{\infty} g_i(x_i)\,dx_i - p=0\ldots\ldots(34)$$

$$\bar{n}=\sum_i \bar{n}_i\ldots\ldots(35)$$

の連立方程式が成立する。いま、この連立方程式体系が、関数 $x_i^*=h_i(p)$ を陰伏的に定義していると仮定すると、普及率 p での期待均衡需要曲線 ED の高さは、

普及率 p の関数として、

$$ben^*_{with}(p) = ben_{c,with}(p, x^*_c)|_{p,x^*_c=h_c(p)}$$
$$= ben_{l,with}(p, x^*_l)|_{p,x^*_l=h_l(p)}$$
$$= ben_{s,with}(p, x^*_s)|_{p,x^*_s=h_s(p)}$$
$$= ben_{b,with}(p, x^*_b)|_{p,x^*_b=h_b(p)} \quad \text{……(36)}$$

となる。しかし、今回のモデルでは、$x^*_i = h_i(p)$を代数的に解くことができない。このため、 p の値を外生的に設定してニュートン法等により(31)から(36)の連立方程式の数値解を求め、その数値解 x^*_c を $ben_{c,with}(p, x_c)$に代入することによって、ED の高さを求めた。

なお、各車種の台数は 表 6の通りである[xix]。

表 6　車種別自動車台数

車種	台数 $\bar{n}_i$ （台）
乗用車 $i=c$	16,076,600
軽貨物車 $i=l$	2,027,053
小型貨物車 $i=s$	1,399,291
普通貨物車 $i=b$	692,074

資料）国土交通省総合政策局情報管理部 H15 年度分『自動車輸送統計年報』の中の、関東運輸局管内の自動車保有車両数

次に、この期待均衡需要曲線の動学的安定性条件についてみてみよう。いま、人々の VICS 普及率に対して共通の普及水準 f を予測しているものとする。この予測の下で実際に実現される普及率 p 、税/補助金を含めたサービス供給価格（VICS 端末価格）を c' とすると、次のような連立方程式が成立する。

$$G^c(f, x_c, c) = ben_{c,with}(f, x_c) - c' = 0 \quad \text{…… (37)}$$
$$G^l(f, x_l, c) = ben_{l,with}(f, x_l) - c' = 0 \quad \text{…… (38)}$$
$$G^s(f, x_s, c) = ben_{s,with}(f, x_s) - c' = 0 \quad \text{……(39)}$$
$$G^b(f, x_b, c) = ben_{b,with}(f, x_b) - c' = 0 \quad \text{…… (40)}$$
$$p = F(x) = \frac{1}{\bar{n}} \sum_i \bar{n}_i \int_{x_i}^{\infty} g_i(x_i)\, dx_i = 0 \quad \text{…… (41)}$$
$$\bar{n} = \sum_i \bar{n}_i \quad \text{…… (42)}$$

(37)-(40)式により、期待普及率 f の各水準に対してベクトル x の値が決まり、いまそれを x' とすると、位相図の傾き $misou_{with}$ は、

$$misou_{with}(f, x)|_{x=x'} = \frac{dp}{df} = \sum_i \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} * - \frac{G^i_f}{G^i_{x_i}}|_{x_i=x'_i}\right) \quad \text{…… (43)}$$

となる。なお、上と同様に、(43)式の値は、 f の値を外生的に設定してニュートン法等により(37)-(40)の数値解を求め、その数値解 x' を(43)式に代入することに

よって求めた。

⑤ VICS 端末装着車全体の私的便益

普及率 p の下で、各車種の装着車全体に発生している便益 $sben_{i,with}(p)$は、(29)式で示した車種別の VICS の私的便益に、(30) 式の車種別確率密度と車種別自動車台数 $\bar{n}_i$ を乗じた式を、限界的な VICS 装着車の走行距離 x_i^* （(31)- (35)の連立方程式の数値解）から距離∞まで定積分したものとなる。そして、装着車全体の総便益は、それを 4 車種合計したものとなる。したがって、装着車全体の総私的便益 $sben_{with}$ は、

$$sben_{with}(x,p)|_{x=x^*}=\sum_i sben_{i,with}(x_i,p)|_{x_i=x_i^*}=\sum_i \bar{n}_i\int_{x_i^*}^{\infty} ben_{i,with}(p,x_i)\,g_i(x_i)\,dx_i \quad ..(44)$$

となる。

一方、装着車が 1 台増加したときの装着車全体にとっての私的限界便益 $msben_{with}$ （*MPW* 曲線）は、

$$msben_{with}(x,p)|_{x=x^*}=\frac{1}{\bar{n}}\sum_i \left(\frac{d(sben_{i,with}(x_i,p))}{dp}|_{x_i=x_i^*}+\frac{d(sben_{i,with}(x_i,p))}{dx_i}|_{x_i=x_i^*}\frac{dx_i}{dp}|_{x_i=x_i^*}\right)\cdot \quad \cdots\cdots (45)$$

ろなる。ここで、$\frac{dx_i}{dp}$ は、(31)-(34)式に陰関数法則を適用し、

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F^l}{\partial x_c} & \frac{\partial F^l}{\partial x_l} & \frac{\partial F^l}{\partial x_s} & \frac{\partial F^l}{\partial x_b} \\ \frac{\partial F^s}{\partial x_c} & \frac{\partial F^s}{\partial x_l} & \frac{\partial F^s}{\partial x_s} & \frac{\partial F^s}{\partial x_b} \\ \frac{\partial F^b}{\partial x_c} & \frac{\partial F^b}{\partial x_l} & \frac{\partial F^b}{\partial x_s} & \frac{\partial F^b}{\partial x_b} \\ \frac{\partial F}{\partial x_c} & \frac{\partial F}{\partial x_l} & \frac{\partial F}{\partial x_s} & \frac{\partial F}{\partial x_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dx_c}{dp} \\ \frac{dx_l}{dp} \\ \frac{dx_s}{dp} \\ \frac{dx_b}{dp} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial F^l}{\partial p} \\ \frac{\partial F^s}{\partial p} \\ \frac{\partial F^b}{\partial p} \\ \frac{\partial F}{\partial p} \end{bmatrix} \quad \cdots\cdots (46)$$

を解いて求めた。

⑥ VICS 端末装着車と非装着車に共通して発生している便益

次に、VICS端末装着車と非装着車に共通して発生している便益（図 6の「②市場で評価されない装着車の便益」と「③非装着車の便益」）について定式化する。

ア） 旅行時間短縮便益

旅行時間の短縮は、装着車と非装着車双方に共通して発生している。そして、

その便益の大きさは、車種iにとっては、$-\frac{\bar{w}_i}{\bar{v}_o} x_i \; rt_{without}(p)$で示される。車種別の総便益$sobentsave_i$は、これに(30)式の確率密度と自動車の台数$\bar{n}_i$を乗じた式を、走行距離0から距離∞まで走行距離で定積分したものとなる。そして、総便益$sobentsave$は、それを4車種合計したものとなり、

$$sobentsave(p)=\sum_i sobentsave_i(p)=-\sum_i \bar{n}_i \; rt_{without}(p)\frac{\bar{w}_i}{\bar{v}_o}\int_0^\infty x_i \; g_i(x_i)\,dx_i \quad \cdots\cdots (47)$$

となる。

そして、装着車が1台増加したときの限界便益$msobentsave$は、

$$msobentsave(p)=\frac{1}{\bar{n}}\frac{d(sobentsave(p))}{dp} \quad \cdots\cdots (48)$$

となる。

イ） 走行経費削減便益

次に、装着車、非装着車に共通して発生する走行経費削減便益は、車種iにとっては、$(\frac{1}{er_{i,0}}-\frac{1}{er_{i,without}(p)})x_i$となる。ここで$er_{i,0}=er_i(v_0)$である。車種別の総エネルギー削減便益$sobenensave_i$は、これに(30)の確率密度と自動車の台数$\bar{n}_i$を乗じた式を、走行距離0から距離∞まで走行距離で定積分し、さらにエネルギー価格を乗じたものとなる。総便益$sobenensave$は、それを4車種合計したものとなり、

$$sobenensave(p)=\sum_i sobenensave_i(p)=$$

$$\sum_i \bar{p}_i^e \; \bar{n}_i(\frac{1}{er_{i,0}}-\frac{1}{er_{i,without}(p)})\int_0^\infty x_i \; g_i(x_i)\,dx_i \quad \cdots\cdots (49)$$

となる。

そして、装着車が1台増加したときの限界便益$msobenensave$は、

$$msobenensave(p)=\frac{1}{\bar{n}}\frac{d(sobenensave(p))}{dp} \quad \cdots\cdots (50)$$

となる。

⑦ 炭素排出削減便益

次に、炭素排出削減便益であるが、これは、エネルギー消費削減量に、ガソリン或いは軽油1ﾘｯﾄﾙの炭素含有量と炭素の社会的費用を乗じたものである。したがって、総炭素排出削減便益$sbenenv$は、

$$sbenenv(x,p)|_{x=x^*}=\sum_i sbenenv_i(x,p)|_{x=x^*}$$

$$=\bar{p}^c\sum_i \bar{\tau}_i \; \bar{n}_i((\frac{1}{er_{i,0}}-\frac{1}{er_{i,without}(p)})\int_0^\infty x_i \; g_i(x_i)\,dx_i +$$

$$(\frac{1}{er_{i,without}(p)}-\frac{1}{er_{i,with}(p)})\int_{x_i^*}^\infty x_i \; g_i(x_i)\,dx_i) \quad \cdots\cdots (51)$$

$\bar{\tau}_c, \bar{\tau}_l$ ：ガソリン 1 ﾘｯﾄﾙの炭素含有量　0.64kgc /ﾘｯﾄﾙ [xx]

$\bar{\tau}_s, \bar{\tau}_b$ ：軽油 1 ﾘｯﾄﾙの炭素含有量　0.72kgc /ﾘｯﾄﾙ [xxi]

$\bar{p}^c$ ：炭素 1kgの社会的費用　30 円/kgc[xxii]

となる。

一方、装着車が 1 台増加したときの限界便益 *msbenenv* は、(45) (46)式と同様の手法で、

$$msbenenv(x,p)|_{x=x^*} = \frac{1}{n}\sum_i \left(\frac{d(sbenenv(x_i,p))}{dp}|_{x_i=x_i^*} + \frac{d(sbenenv(x_i,p))}{dx_i}|_{x_i=x_i^*}\frac{dx_i}{dp}|_{x_i=x_i^*}\right) \quad \cdots\cdots (52)$$

で求めることができる。

⑧　社会的便益と社会的限界便益

社会的便益は、上で求めた装着車全体の総私的便益((44)式)と、VICS 端末装着車と非装着車に共通して発生している便益 ((47) (49) 式)、炭素排出削減便益 ((51) 式)を合計したものである。したがって、社会的便益 *sumben* は

$$sumben(x,p)|_{x=x^*} = sben_{with}(x,p)|_{x=x^*} + sobentsave(p) + sobenensave(p) + sbenenv(x,p)|_{x=x^*} \quad \cdots\cdots (53)$$

となる。

一方、装着車が 1 台増加したときの社会全体にとっての社会的限界便益 *msumben* は、(45) (48) (50) (52) 式より、

$$msumben(x,p)|_{x=x^*} = msben_{with}(x,p)|_{x=x^*} + msobentsave(p) + msobenensave(p) + msbenenv(x,p)|_{x=x^*} \quad \cdots\cdots (54)$$

となる（*MSW* 曲線）

⑨　社会的限界コスト

最後に、社会的限界コストであるが、VICS の場合、ユーザーの負担は、VICS 対応カーナビゲーションシステム購入費用と、それを購入する時に負担しなければならない視聴料 315 円（うち消費税 15 円）のみである。それ以外、ユーザーは何ら追加で利用料等を支払うことなくサービスを受けることができる。

いま､視聴料を含むVICS対応カーナビゲーションシステムの価格が 20 万円、その使用年数を 10.99 年 [xxiii]とすると、1 ヶ月あたりの利用料金は 1,519 円となる。ここでは、規模に関する収穫一定を仮定し、これを、社会的限界コストの近似値とする。

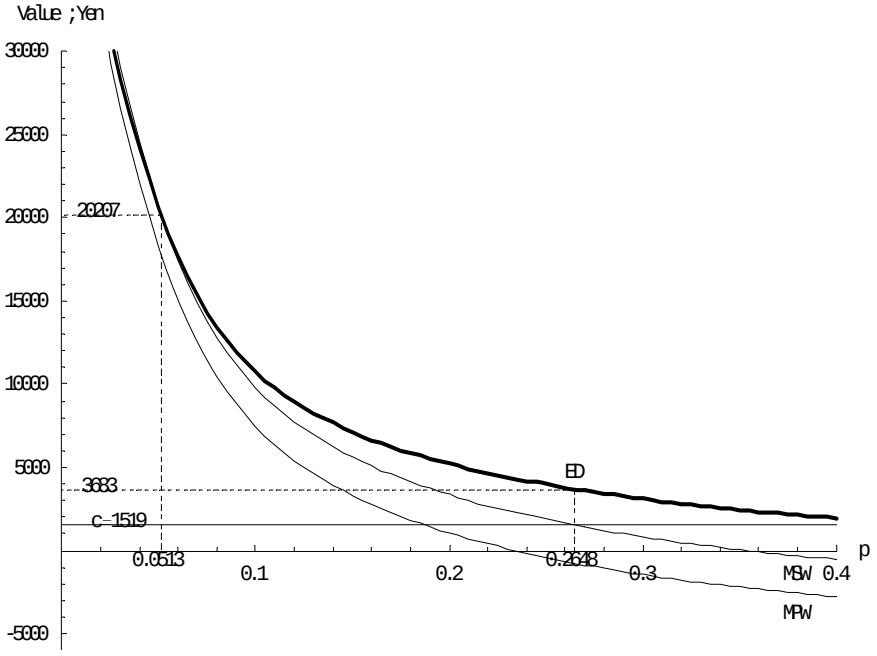
４． シミュレーション結果

以上のような手法によって、旅行時間の短縮率（(19)(20)式のα、β）の様々な組合せのもとで、VICS の期待均衡需要曲線 *ED*、装着車全体にとっての私的限界便益 *MPW*、社会的限界便益 *MSW*、さらには市場普及水準、最適普及水準を算出した。結果は以下の通りである。

（1） VICS の期待均衡需要曲線 *ED*、装着車全体にとっての私的限界便益 *MPW*、社会的限界便益 *MSW*

まず、期待均衡需要曲線 *ED*、装着車全体にとっての私的限界便益 *MPW*、社会的限界便益曲線 *MSW* のそれぞれの形状と位置関係を確認するため、旅行時間短縮率パラメータ（α、β）を(0.1,0.04)とおいて、それぞれの曲線を描いてみた。これが、図 7である[xxiv]。

社会的限界コストと社会的限界便益曲線 *MSW* との交点が最適普及水準を示すが、このケースでは、普及率 26.48%が最適普及水準となる[xxv]。しかし、この普及水準では、期待均衡需要曲線 *ED* は社会的限界便益曲線 *MSW* の上方に位置しており、市場に委ねた場合、普及水準は最適普及水準を上回ることになる。市場で普及率 26.48%を達成するためには、ユーザー価格は 3,683 円でなければならない。したがって、最適普及水準を達成するためには、3,683 円と社会的限界コスト（1,519 円）との差である 2,164 円を、VICS端末１ユニットあたりに課税しなければならないことになる。



（100α＝10%、100β=4%とした場合）

図 7　期待均衡需要曲線、装着車全体にとっての私的限界便益、社会的限界便益

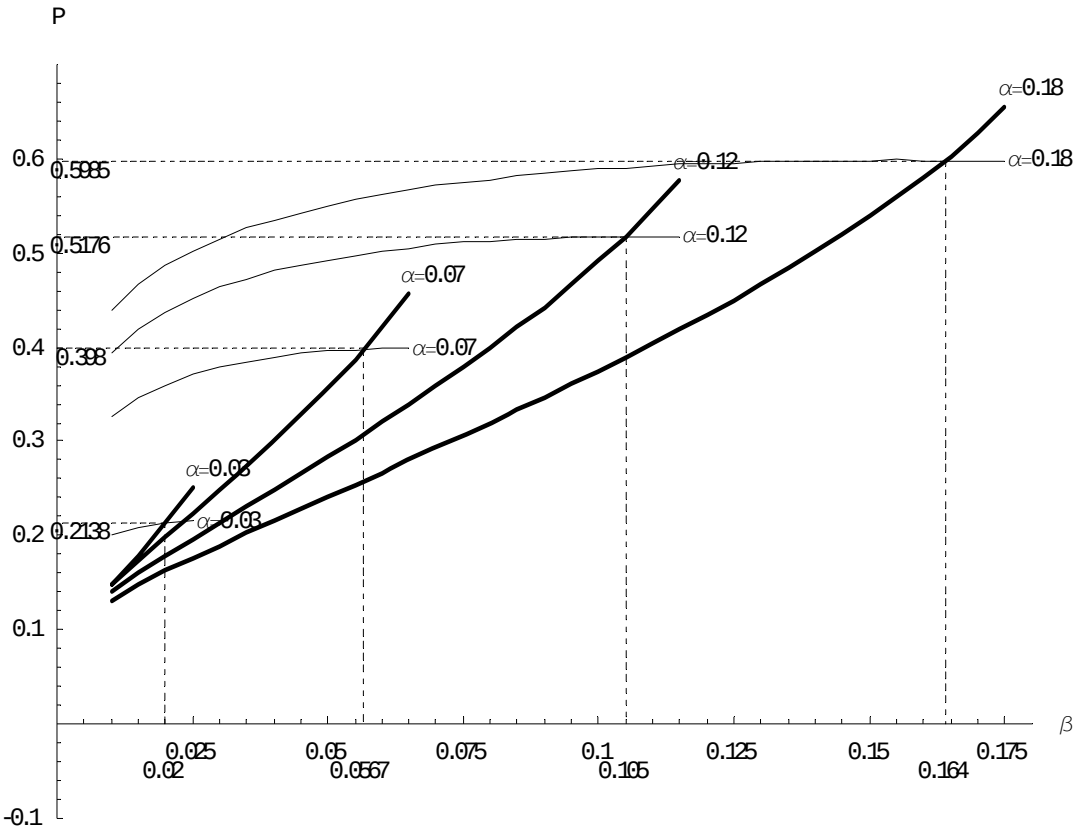
（2） 旅行時間短縮率の組合せと最適普及水準、市場普及水準、税/補助金水準

次に、旅行時間短縮率パラメータ(α、β)について、様々なケースを設定して最適普及水準、市場普及水準を算出した。この結果を示したのが 図 8である。図8の４本の細線は、それぞれ、αが 0.03、0.07、0.12、0.18 の４ケースについて、βの値との組合せで、市場普及水準がどのように変化するのかを示している。一方、４本の太線は、同じくαが 0.03、0.07、0.12、0.18 の４ケースについて、βの値との組合せで、最適普及水準がどのように変化するのかを示している[xxvi]。

まず、市場普及水準についてみると、同じαについては、β が大きい程、市場普及率は高くなる。これは、β が大きくなると、期待均衡需要曲線 *ED* が右方へシフトするからである。同様に、同じ β については、αが大きい程、市場普及率は高くなる。αが大きくなると、期待均衡需要曲線 *ED* が右方へシフトするからである。

次に、最適普及水準についてみてみよう。市場普及水準と同様に、同じαについては、βが大きい程、最適普及水準は高くなる。これは、βが大きくなる程、マイナスのネットワーク外部性の効果が弱まり、装着車全体にとっての私的限界便益の負の傾きが小さくなるからである。そして、それに加え、VICS端末装着車と非装着車に共通して発生している便益（図 6の「②市場で評価されない装着車の便益」と「③非装着車の便益」）が大きくなるからである。しかし、市場普及水準とは異なり、同じβについてはαが大きい程、最適普及水準は低くなる。これは、αとβの乖離が大きくなる程、マイナスのネットワーク外部性の効果の影響が大きくなり、装着車全体にとっての私的限界便益の（負の）傾きの勾配が大きくなるからである。

さらに、市場普及水準と最適普及水準の関係をみてみよう。まず、両者の傾きを比較すると、β に対しては最適普及水準のほうがより大きく反応している。これは、β の装着車全体にとっての私的限界便益、社会的限界便益双方に与える影響が、市場普及水準に与える影響よりも大きいことを示している。次に、市場普及水準と最適普及水準の一致する点を(α,β, p)で示すと、(0.03,0.02、0.2138)、(0.07,0.0567,0.398)、(0.12,0.105, 0.5176)、(0.18,0.0164, 0.5985)となっている。それぞれの(α,β, p)の組合せで、期待均衡需要曲線 *ED* と社会的限界便益曲線 *MSW* は交差している。それぞれの α の水準において、β がこの水準を上回れば、最適普及水準は市場普及水準を上回り、最適普及水準達成のためには VICS ユニットに補助金を交付しなければならない。逆に、それぞれの α の水準において、β がこの水準を下回れば、最適普及水準は市場普及水準を下回り、最適普及水準達成のためには VICS ユニットに課税しなければならない。



注）細線は、旅行時間短縮率パラメータ(α、β)の下での市場普及水準を示す。一方、太線は、旅行時間短縮率パラメータ(α、β)の下での最適普及率を示す。

図 8　旅行時間短縮率の組合せと市場普及水準、最適普及水準

図 9は、図 8と同様に、αが 0.03、0.07、0.12、0.18 の４ケースについて、βの値との組合せで、最適普及水準達成のために必要となる税/補助金水準を示している。縦軸のプラス領域は課税、マイナス領域は補助金を示すが、βがαに近い数値でない限り（即ち、マイナスのネットワーク外部性が弱いものでない限り）、最適普及水準達成のためには課税が必要となることが分かる。

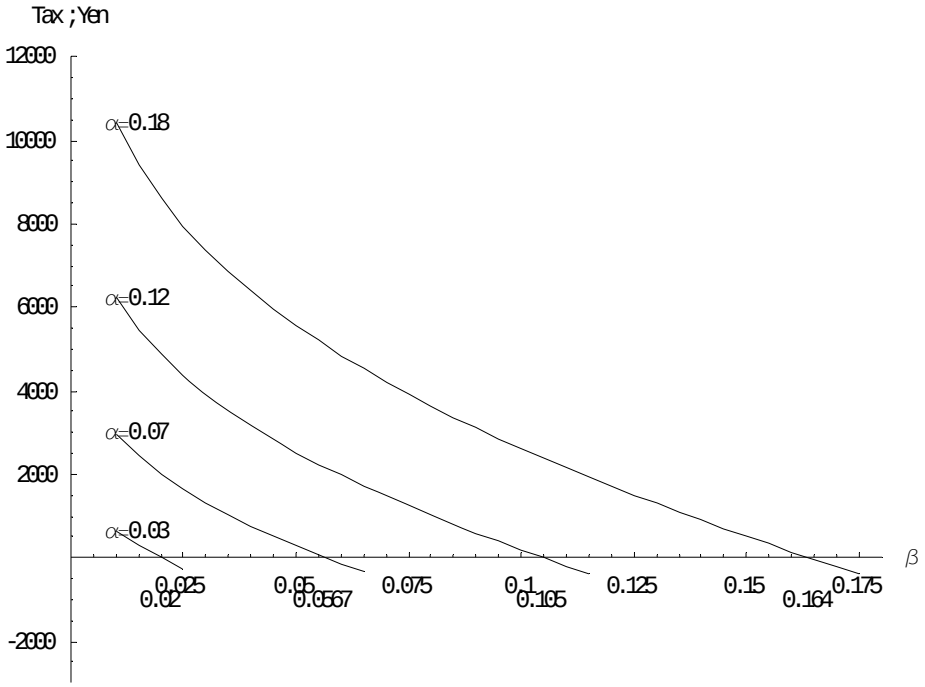


図 9　旅行時間短縮率の組合せと最適普及水準達成のための税/補助金(1)

さらに、αの最小値を 0.01、最大値を 0.18 として、区間 0.005 毎、合計 35 個のαの値について、最適普及水準と市場普及水準が等しくなるβの値を算出した。図 10の太線は、その点を直線で結んだものである。一方、図中の細線は、45°線、即ちαとβが等しくネットワーク外部性がゼロとなるαとβの組合せを示している。太線から下方の領域は、最適普及水準達成のためには課税が必要となる領域であり、太線と細線で囲まれた部分は、最適普及水準達成のためには補助金が必要となる領域である。図 9と同様、βがαに近い数値でない限り（即ちマイナスのネットワーク外部性が弱いものでない限り）最適普及水準達成のためには課税が必要となることが分かる。

一方、見方を変えると、太線のα、βの組合せは、マイナスのネットワーク外部性が、装着車全体にとっての私的限界便益を押し下げる効果（期待均衡需要曲線 *ED* と装着車限界便益曲線 *MPW* との差）と、VICS端末装着車と非装着車に共通して発生している便益（図 6の「②市場で評価されない装着車の便益」と「③非装着車の便益」）の限界値と炭素排出削減便益の限界値の合計値（装着車全体にとっての私的限界便益曲線 *MPW* と社会的限界便益曲線 *MSW* との差）が等しくなるようなα、βの組合せを示している。本シミュレーションでは、VICS端末装着車に帰属するカーナビゲーション機能の便益は計測していない。しかし、この便益にはネットワーク外部性がない。いま仮に、本稿で推計した私的便益の大きい者ほどカーナビゲーション機能に対する価値付けも大きいと仮定すれば、カーナビゲーション機能の便益を含めたとしても、(12)式で示される私的限界便益曲線 *MPW* の高さと期待均衡需要曲線 *ED* の高さの差、社会的限界便

益曲線 *MSW* と期待均衡需要曲線 *ED* の高さの差、には変化はない。したがって、カーナビゲーション機能の便益を含めれば、図 7で示した３つの曲線は、それぞれの位置関係を変化させることなく全体が上方にシフトすることになる。これは、最適普及水準達成のために課税が必要となる可能性をさらに高めるものである。

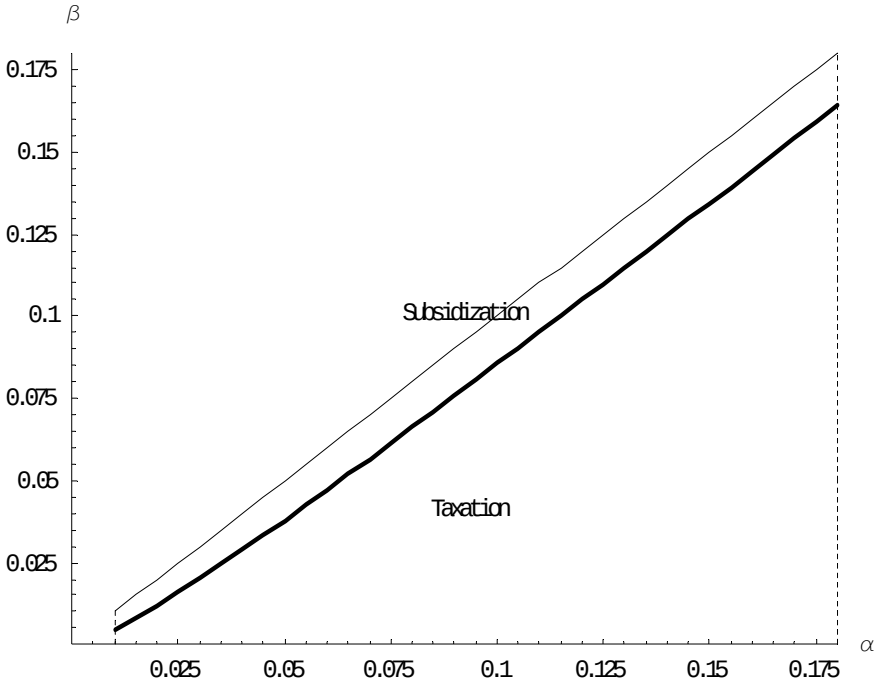


図 10　旅行時間短縮率の組合せと最適普及水準達成のための税/補助金(2)

（3） 動学的安定性

次に、最適普及水準の動学的安定性をチェックしてみよう。図 11の４本の曲線は、図 8、図 9と同様に、α が 0.03、0.07、0.12、0.18 の４ケースについて、β の値との組合せで、最適普及水準における位相図の傾きを示したものであり、(43)式、$misou_{with}(f,x)|_{x=x'}$ の f に最適普及水準を代入して求めている。

これをみると、α が 0.18 で且つネットワーク外部性の効果が極めて弱い場合(β が 0.165,170,175 の３ケース)を除き、位相図の傾きは-1 より大きい。従って、最適普及水準の近傍では、回転運動をしながら最適普及水準に収束していくことが分かる。

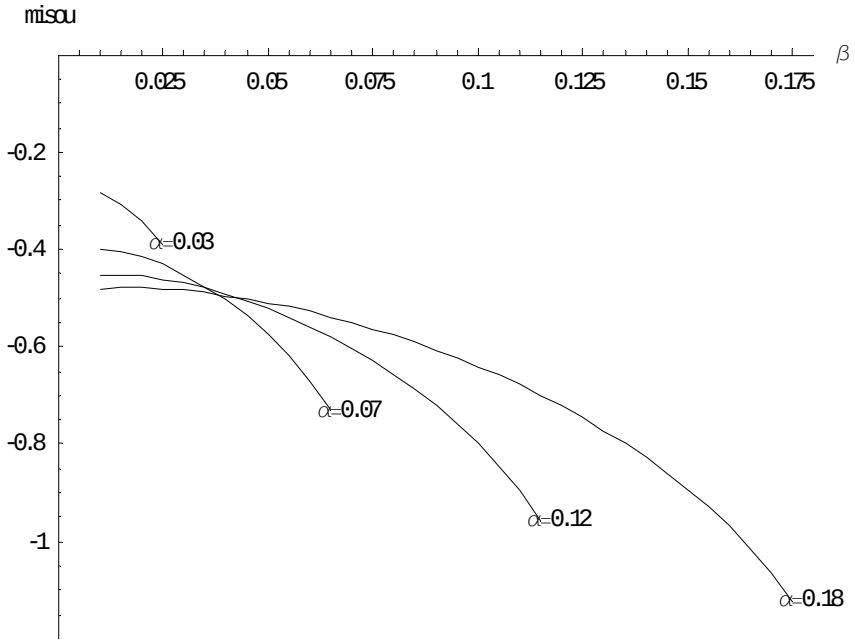


図 11　旅行時間短縮率の組合せと最適普及水準の動学的安定性

V　まとめ

以上、本稿は、ITSサービスを一方向外部性、ネットワーク外部性という２つ外部性を軸に整理する(II)とともに、1)プラスの一方向外部性とマイナスのネットワーク外部性を有するサービス、2)一方向外部性はプラスであるがネットワーク外部性の符号が普及率によって変化するサービスの２類型について、需要曲線の性質、市場均衡普及水準と最適普及水準との乖離、最適普及水準達成に必要な税・補助金政策等を理論的整理した(III)。

さらに、マイナスのネットワーク外部性を有するサービスとしてVICSを取り挙げ、その便益を詳細に分類するとともに、シミュレーションを行い、社会的限界便益や最適普及水準を計測した。そして、最適普及水準を達成するためには、VICSには課税が必要となる可能性があることを示した(IV)。

[i] ネットワーク外部性の概念は、Libenstein(1950)が消費の外部性として「バンドワゴン効果(bandwagon Effect)」（プラスの消費の外部性）と「スノブ効果(Snob Effect)」（マイナスの消費の外部性）を提唱したのが最初である。そして、Rohlfs(1974)によって、「通信需要の相互依存性」として定式化された。通常、ネットワーク外部性という概念は、外部性の符号がプラスの場合に使われるが、本稿では、外部性の符号がマイナスの場合にもこれを用い、「プラスのネットワーク外部性」、「マイナスのネットワーク外部性」と区別して記述する。

[ii] 以下の議論の内、期待均衡需要曲線とその動学的安定性に関する議論は、Rohlfs(1974)、林(1992)の分析枠組みに準拠している。但し、Rohlfs(1974)、林(1992)は、$g(f)$、$u_0(p)$について線形の関数を仮定して議論を展開しているのに対し、本稿は、関数型を特定せずに議論を行う。

[iii] $p1$は、社会的厚生を最大にする最適普及水準であるが、この普及水準において社会的純便益がプラスであるという保証はない。

[iv]旧建設省道路局『道路交通センサス』の沿道環境分類の「DID」と「その他市街部」を指す。

[v]旧建設省道路局『道路交通センサス』の沿道環境分類のうち、「平地部」と「山地部」を指す。

[vi] VICS による旅行時間短縮については、幾つかの実走行実験が行われている。(社)新交通管理システムが 1997 年 2 月に行った東京都内（新宿 3 丁目から芝 5 丁目）での実走行実験では、VICS 端末装着車は VICS 非装着のカーナビ装着車よりも 4.4%旅行時間が削減された報告している（UTMS (1997)）。また道路・交通・車両インテリジェント化推進協議会が 1997 年から開始したモデル地区実験では、豊田市（豊田町南から栄町）において、最大約 20%、日平均で 10%程度、旅行時間が削減されたと報告している。（道路・交通・車両インテリジェント化推進協議会(2000)）

[vii]旧建設省道路局『道路交通センサス』の沿道環境分類であり、「DID（Densely Inhabited District）」、「その他市街部」、「平地部」、「山地部」に分けられている。

[viii] H11 年『道路交通センサス』表 2-1「道路種類別沿道状況別改良未改良別整備未整備別 12 時間平均交通量表－合計/平日－」（関東臨海ブロック、関東内陸ブロック）旧建設省道路局

[ix]鹿島他(2003) p.166.

[x]鹿島他(2003)p.167 で示されている軽自動車、小型乗用車、普通乗用車それぞれの 10/15 モード燃費を、関東運輸局管内の車種別保有台数で加重平均して算出。

[xi]鹿島他(2003)p.167 で示されている軽自動車の 10/15 モード燃費を使用した。
[xii]細井(1998)
[xiii]H15 年度分『自動車輸送統計年報』国土交通省総合政策局情報管理部で示される関東運輸局管内貨物車の能力トンキロを走行キロで除した求めた値を参考に設定した。
[xiv]普通貨物車については、車両重量は最大積載量の 55%程度であることから設定（谷下他(未定稿)参照）。小型貨物車については、各種資料を参考にして最大積載量と整合的な一般的な値を置いた。
[xv]H15 年度分『自動車輸送統計年報』国土交通省総合政策局情報管理部示される関東運輸局管内貨物車の輸送トンキロを能力トンキロで除して求めた。
[xvi]H15『乗用車市場動向調査(H16.3)』、H14『小型・軽トラック市場動向調査(H15.3) 』、H14『普通トラック市場動向調査(H15.3)』、以上（社）日本自動車工業会。
[xvii]η_{x_i} が全国平均値から算出したものであり、これを関東運輸局管内の数値に変換するために設定したもの。まず、H15 年度分『自動車輸送統計年報』国土交通省総合政策局情報管理部示される関東運輸局管内貨物車・乗用車の年間走行キロをそれぞれの保有車両数で除して 1 台あたりの走行キロを求めた。そして、これを、同様にして求めた全国値で除して κ_i を求めた。
[xviii]H11 年『道路交通センサス』旧建設省道路局より算出
[xix]後述する式展開で分かるように、便益の限界値に対しては、台数はなんら影響を与えない。
[xx]鹿島他(2003) p.166.
[xxi]鹿島他(2003) p.166.
[xxii]藤原他(2002) p.18
[xxiii]自動車の平均使用年数を示す。『わが国の自動車保有動向』（財）自動車検査登録協力会　平成 16 年版
[xxiv]これらの曲線は、横軸（普及率 p）の最小値を 0.005、最大値を 0.4 として、区間 0.005 毎、合計 80 個の p の値について縦軸の値を求め、点を直線で結んで描いたものである。
[xxv] この普及水準での車種別普及率は、乗用車 19.14%、軽貨物車 38.84%、小型貨物車 56.61%、普通貨物車 100%となっている。また、便益の総額は月間 666 億円であり、その構成比は、VICS 端末装着車全体の私的便益 81.2%、VICS 端末装着車と非装着車に共通して発生している便益 18.3%、炭素排出削減便益 0.5%である。
[xxvi] α が 0.03 の場合、β の値は 0.01、0.015、0.020、0.025 の 4 パターンについて最適普及水準、市場普及率を計算し、点を直線で結んで図示している。α が 0.07 の場合は、β の最小値を 0.01、最大値を 0.065 として、区間 0.005 毎、合

計 12 個の β の値について市場普及率を計算し、点を直線で結んで図示している。同様に、α が 0.12 の場合 β の最小値を 0.01 最大値を 0.115 とし、α が 0.18 の場合 β の最小値を 0.01 最大値を 0.175 として、それぞれ、合計 22 個、34 個の β の値について市場普及率を計算し、点を直線で結んで図示している。図 8、図 9、図 11は、全てこれと同様の旅行時間短縮率パラメータの組合せの下で値を算出し、点を直線で結んで図示している。

参考文献

鹿島茂、谷下雅義、三好博昭他編著『地球環境世紀の自動車税制』（日本交通政策研究会研究双書（17））剄草書房, 2003 年 10 月

道路・交通・車両インテリジェント化推進協議会『ITS モデル地区実験構想の調査研究報告書』, 2000 年３月

谷下雅義・鹿島茂・栗原崇晃・湊清之「普通ディーゼル貨物車燃費規制の影響分析」（未定稿）

林敏彦「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－』pp 123-143、東洋経済新報社、1992 年 10 月

藤原徹、蓮池勝人、金本良嗣「自動車関係税制を活用した地球環境対策の評価」金本良嗣主査『交通分野における環境政策の経済分析』(日交研シリーズ A-319)、日本交通政策研究会、2002 年８月

細井賢三「CO_2 排出総量の算出に必要な走行モードと排出係数について」日本自動車研究所『自動車研究』Vol20, No.9, pp.395-399.1998 年９月

Ben-Akiva, M., De Palma, A., Kaysi, I.(1991), “Dynamic Network models and Drivers Information Systems”, *Transportation Research Part A*, Vol.25, pp.251-266.

Emmerink, R.H.M , Nijkamp, P., Rietveid, P.,(1994), “The Economics of Motorist Information System”, *Transport Review*, Vol14, No.4, pp.363-388.

Emmerink, R.H.M., Axhausen, K.W., Nijkamp, P., Rietveld, P. (1995a),

"Effects of Information in Road Transport Networks with Recurrent Congestion", *Transportation, Vol.*22 , pp.21-53.

Emmerink, R.H.M., Axhausen, K.W., Nijkamp, P., Rietveld, P. (1995b), "The Potential of Information Provision in a Simulated Road Transport Network with Non-Recurrent Congestion", *Transportation Research Part C, Vol.3* , pp.293-309.

Koutsopoulos, H.N., Lotan, T.(1990) "Motorist Information Systems and Recurrent Traffic Congestion: Sensitivity Analysis of Expected Result", *Transportation Research Record, Vol.1281* , pp.145-158.

Libenstein, H.(1950) "Bandwagon, Snob and Veblen Effects in the Theory of Consumer's Demand", *Quarterly Journal of Economics*, Vol.64, pp.183-207.

Lo, H.K., Szeto, W.Y.(2002), "A Methodology for Sustainable Traveler Information Services", *Transportation Research Part B,* Vol.36, pp.113-130.

Mahmassani, H., Jarakrishnan, R.,(1991), "System Performance and User Response under Real-time Information in a Congested Traffic Corridor", *Transportation Research Part A*, Vol.25, pp.293-307.

Rohlfs, J.(1974) "A Theory of Independent demand for a Communications Service", *Bell Journal of Economics and Management Science*, Vol.5, pp.16-37.

UTMS (1997), "UTMS Dynamic Route Guidance Systems Verification Test"

Yang, H.(1998), "Multiple Equilibrium Behavior and Advanced Traveler Information Systems with Endogenous Market Penetration", *Transportation Research Part B*, Vol.32, pp.205-218.

Yang, H.(1999), "Evaluating the Benefit of a Combined Route guidance and Road Pricing System in a Network with Recurrent Congestion", *Transportation*, Vol.26, pp.299-322.

Yin, Y., Yang, H.(2003), "Simultaneous determination of the Equilibrium

Market Penetration and Compliance Rate of Advanced Traveler Information Systems", *Transportation Research Part A,* Vol.37, pp.165-181.